



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE RUEDAS DE PERFIL PARA BICICLETA DE CARRETERA Y TRIATLÓN

PFC presentado para optar al título de Ingeniero
Técnico Industrial especialidad Mecánica

por **Sergi Liz Madrid**

Barcelona, 8 de Junio de 2016

Tutor proyecto: José Antonio Travieso Rodríguez

Departamento de Ingeniería Mecánica (DIM)

Universidad Politécnica de Catalunya (UPC)





Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Índice general

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE RUEDAS DE PERFIL PARA BICICLETA DE CARRETERA Y TRIATLÓN

PFC presentado para optar al título de Ingeniero
Técnico Industrial especialidad Mecánica

por **Sergi Liz Madrid**

Barcelona, 8 de Junio de 2016

Tutor proyecto: José Antonio Travieso Rodríguez

Departamento de Ingeniería Mecánica (DIM)

Universidad Politécnica de Catalunya (UPC)

ÍNDICE GENERAL

Índice general	2
ÍNDICE GENERAL	3
Memoria	7
ÍNDICE MEMORIA	8
RESUMEN	11
RESUM	11
ABSTRACT	12
AGRADECIMIENTOS	13
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	14
1.1. Motivación	14
1.2. Objetivos	15
1.3. Alcance	16
CAPÍTULO 2: ASPECTOS TEORICOS SOBRE LAS BICICLETAS.....	17
2.1. Historia	17
2.2. Descripción del material	18
2.3. Partes de una rueda de bicicleta	21
2.3.1. Aro.....	21
2.3.2. Radio.....	21
2.3.3 Buje	23
2.4. Restricciones de la rueda	23
2.4.1. Restricciones geométricas	23
2.4.2. Test obligatorio.....	24
2.5. Análisis de fuerzas que actúan sobre una rueda.....	27
CAPÍTULO 3: ESTUDIO DE MERCADO	30
3.1. Análisis de los modelos existentes en el mercado: marcas y modelos.....	30
3.1.1. Bontrager.....	31
3.1.2. ZIPP	32
3.1.3. Mavic.....	32
CAPÍTULO 4: DISEÑO DE LA RUEDA	34
4.1 Diseño del aro	34
4.2. Elementos normalizados	36
4.2.1 Radios	36
4.2.2 Buje/eje.....	36

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS AERODINAMICO	37
5.1. Conceptos generales	38
5.1.1 Viento relativo	38
5.2. Parámetros a estudio	42
5.3. Definición del dominio del estudio	44
5.4. Resultados.....	49
5.4.1. Simulación del Aro 1.....	49
5.4.1. Simulación del Aro 2.....	50
5.4.3. Análisis de resultados	52
5.4.4. Conclusiones de las simulaciones	53
CAPÍTULO 6: ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA RUEDA DISEÑADA	55
6.1. Condiciones de contorno.....	56
6.1.1. Test de rigidez frontal.....	58
6.1.2. Test de rigidez lateral	58
6.1.3. Simulación del Test de rigidez frontal	59
6.1.4. Simulación del Test de rigidez lateral.....	60
6.2. Elección de radios	63
6.3. Análisis de la estructura con fibra de carbono.....	63
6.3.1. Material utilizado por el fabricante PROGRESS	63
6.3.2. Laminado de fibras prepeg: criterio de laminación.....	64
6.3.3. Criterio de simulación	65
6.3.4. Partes laminadas.....	69
6.3.5. Simulación de rigidez frontal	72
6.3.6. Simulación de rigidez lateral (caso más crítico 250N).....	73
6.3.7. Conclusión de las simulaciones	75
CAPÍTULO 7: GEOMETRIA DISEÑADA.....	76
7.1. Aro	76
7.2. Buje.....	76
7.3. Radios.....	76
CAPÍTULO 8: FABRICACIÓN	77
8.1. Restricciones de fabricación máquinas y materiales.....	77
8.1.1. Máquinas	77
8.1.2. Materiales	78
8.1.3. Molde	79
8.2. Fabricación de la pieza de material compuesto	80
8.2.1. Preparación del molde	80

8.2.2. Corte de la fibra de carbono	81
8.2.3. Fabricación del aro	81
8.2.4. Laminado sobre el núcleo	82
8.2.5. Colocación interior del molde	82
8.2.6. Curado	82
8.2.7. Desmoldeo	83
8.2.8. Taladrado.....	83
8.2.9. Limpieza de aro	83
8.2.10. Pintura y lacado	84
8.2.11. Montaje de radios y buje	84
8.2.12. Control de calidad	84
CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES	85
CAPÍTULO 10: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
Anexos	92
ÍNDICE ANEXOS.....	93
ANEXO 1: HOJAS DE RUTA	94
1. Molde hembra	94
2. Molde macho	95
3. Molde intermedio sin válvula	96
4. Molde intermedio con válvula	97
Planos	98
ÍNDICE DE PLANOS.....	99
1. Plano aro.....	100
2. Plano molde hembra	101
3. Plano molde macho	102
4. Plano molde intermedio con válvula	103
5. Plano molde intermedio sin válvula	104
Estudio económico	105
ÍNDICE DE ESTUDIO ECONÓMICO.....	106
Estudio económico	107
1. Costes maquinaria	107
2. Costes materiales	108
3. Coste distribución e ingenieros.....	108
4. Coste por unidad de aro fabricado	108
5. Coste unitario rueda delantera	109
6. Coste unitario rueda trasera	109

7. Costes anuales.....	109
8. Ventas anuales.....	110
9. Balance anual	110



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Memoria

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE RUEDAS DE PERFIL PARA BICICLETA DE CARRETERA Y TRIATLÓN

PFC presentado para optar al título de Ingeniero
Técnico Industrial especialidad Mecánica

por **Sergi Liz Madrid**

Barcelona, 8 de Junio de 2016

Tutor proyecto: José Antonio Travieso Rodríguez

Departamento de Ingeniería Mecánica (DIM)

Universidad Politécnica de Catalunya (UPC)

ÍNDICE MEMORIA

Memoria	7
ÍNDICE MEMORIA	8
RESUMEN	11
RESUM	11
ABSTRACT	12
AGRADECIMIENTOS	13
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	14
1.1. Motivación	14
1.2. Objetivos	15
1.3. Alcance	16
CAPÍTULO 2: ASPECTOS TEORICOS SOBRE LAS BICICLETAS.....	17
2.1. Historia	17
2.2. Descripción del material	18
2.3. Partes de una rueda de bicicleta	21
2.3.1. Aro.....	21
2.3.2. Radio.....	21
2.3.3 Buje	23
2.4. Restricciones de la rueda	23
2.4.1. Restricciones geométricas	23
2.4.2. Test obligatorio.....	24
2.5. Análisis de fuerzas que actúan sobre una rueda.....	27
CAPÍTULO 3: ESTUDIO DE MERCADO	30
3.1. Análisis de los modelos existentes en el mercado: marcas y modelos.....	30
3.1.1. Bontrager.....	31
3.1.2. ZIPP	32
3.1.3. Mavic.....	32
CAPÍTULO 4: DISEÑO DE LA RUEDA	34
4.1 Diseño del aro	34
4.2. Elementos normalizados	36
4.2.1 Radios	36
4.2.2 Buje/eje.....	36
CAPÍTULO 5: ANÁLISIS AERODINAMICO	37
5.1. Conceptos generales	38

5.1.1 Viento relativo	38
5.2. Parámetros a estudio	42
5.3. Definición del dominio del estudio	44
5.4. Resultados	49
5.4.1. Simulación del Aro 1	49
5.4.1. Simulación del Aro 2	50
5.4.3. Análisis de resultados	52
5.4.4. Conclusiones de las simulaciones	53
CAPÍTULO 6: ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA RUEDA DISEÑADA	55
6.1. Condiciones de contorno	56
6.1.1. Test de rigidez frontal	58
6.1.2. Test de rigidez lateral	58
6.1.3. Simulación del Test de rigidez frontal	59
6.1.4. Simulación del Test de rigidez lateral	60
6.2. Elección de radios	63
6.3. Análisis de la estructura con fibra de carbono	63
6.3.1. Material utilizado por el fabricante PROGRESS	63
6.3.2. Laminado de fibras prepeg: criterio de laminación	64
6.3.3. Criterio de simulación	65
6.3.4. Partes laminadas	69
6.3.5. Simulación de rigidez frontal	72
6.3.6. Simulación de rigidez lateral (caso más crítico 250N)	73
6.3.7. Conclusión de las simulaciones	75
CAPÍTULO 7: GEOMETRIA DISEÑADA	76
7.1. Aro	76
7.2. Buje	76
7.3. Radios	76
CAPÍTULO 8: FABRICACIÓN	77
8.1. Restricciones de fabricación máquinas y materiales	77
8.1.1. Máquinas	77
8.1.2. Materiales	78
8.1.3. Molde	79
8.2. Fabricación de la pieza de material compuesto	80
8.2.1. Preparación del molde	80
8.2.2. Corte de la fibra de carbono	81
8.2.3. Fabricación del aro	81

8.2.4. Laminado sobre el núcleo	82
8.2.5. Colocación interior del molde	82
8.2.6. Curado	82
8.2.7. Desmoldeo	83
8.2.8. Taladrado.....	83
8.2.9. Limpieza de aro	83
8.2.10. Pintura y lacado	84
8.2.11. Montaje de radios y buje	84
8.2.12. Control de calidad	84
CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES	85
CAPÍTULO 10: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

RESUMEN

Introducción: El siguiente proyecto pretende agrupar las fases de diseño y fabricación de una rueda de bicicleta de fibra de carbono. Se han utilizado métodos numéricos para realizar simulaciones en los campos estructurales y aerodinámicos de la rueda.

Diseño: En la parte de aerodinámica del diseño, se analiza cómo afecta el ancho y el largo del perfil del aro. Para ello se estudia el DRAG - la fuerza de arrastre contraria al movimiento de la rueda - para cuatro casos diferentes. En la parte estructural, se han realizado simulaciones con las distintas opciones de laminados de fibra de carbono, hasta encontrar la forma óptima.

Fabricación: Se ha explicado el proceso paso a paso para elaborar el aro con la fibra de carbono elegida. También se ha diseñado el molde del aro, así como las hojas de ruta para su fabricación.

Conclusión: Se ha logrado diseñar unas ruedas de mayor aerodinámica, menor peso y con una rigidez suficiente para aguantar las fuerzas de compresión y flexión, con un coste similar a una rueda de calidad inferior.

Palabras clave: Fibra de Carbono · Aerodinámica · Rueda · Triatlón · Unión Ciclista Internacional ·

RESUM

Introducció: El següent projecte té l'objectiu d'agrupar les fases de disseny i fabricació d'una roda de bicicleta de fibra de carboni. S'han utilitzat mètodes numèrics per realitzar simulacions en els camps estructurals i aerodinàmics de la roda.

Disseny: En l'apartat d'aerodinàmica, s'analitza com afecta l'amplada i la llargada del perfil de la llanta. Per a assolir-ho, s'estudia el DRAG - la força d'arrossegament contrària al moviment de la roda - en quatre casos diferents. En l'apartat estructural, s'han realitzat les simulacions amb diferents opcions de laminat de fibra de carboni, fins trobar la forma òptima.

Fabricació: S'ha explicat el procés pas per pas per l'elaboració de la llanta amb la fibra de carboni seleccionada. També s'ha dissenyat el motlle de la llanta, així com les fulles de ruta per la seva fabricació.

Conclusió: Finalment s'ha aconseguit dissenyar unes rodes amb major qualitat aerodinàmica, menor pes i una rigidesa suficient per absorbir les forces de compressió i flexió, amb una cost similar a les d'una roda de qualitat inferior.

Paraules clau: Fibra de Carboni · Aerodinàmica · Roda · Triatló · Unió Ciclista Internacional ·

ABSTRACT

Introduction: The present project has the aim of assembling the design and manufacturing stages of a carbon fibre bicycle wheel. Simulations using numerical methods have been carried out in the structural and aerodynamic fields.

Design: In the aerodynamics section, the influence of the width and length of the rim profile has been analysed. To achieve this, we have studied the DRAG – the force of the drag opposite to the wheel's movement – in four different cases. In the structural section, simulations have been carried out with different options of carbon fibre lamination, to find the optimal form.

Manufacturing: The carbon fibre rim elaboration process has been explained step by step. Furthermore, the rim mould has been designed, as well as its manufacturing roadmaps.

Conclusion: The goal of the project has been achieved: to design a lighter wheel with better aerodynamic qualities and enough stiffness to take up the compression and flexion forces, with a similar cost as that of a lower-quality wheel.

Key words: Carbon Fibre · Aerodynamics · Wheel · Triathlon · Union Cycling International ·

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a mi tutor José Antonio Travieso Rodríguez por su apoyo y consejos durante el desarrollo de este proyecto.

A todos los profesores que han dedicado su tiempo para ayudarme en la investigación del proyecto; Sergio González, Alfredo Guardo, Giovanni Gómez, Jordi Lluma, Pedro Ortiz, y todos los demás profesores que han contribuido en mi formación como ingeniero mecánico.

A mi familia y amigos, por su ayuda y ánimos en momentos en que no encontraba soluciones.

Y a Núria Garcia por todas las horas que ha dedicado para hacer posible el proyecto.

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN

Este trabajo de final de grado trata de estudiar, mejorar y construir unas ruedas para bicicleta de carretera, usando los nuevos materiales y técnicas que se encuentran en el mercado, concretamente con fibra de carbono con una matriz *epoxy*. La rueda se desarrollará a partir de un diseño ya conocido. El principal inconveniente es que al no trabajar en la empresa que fabrica estas ruedas, no hay la posibilidad de que me proporcionen la información sobre sus procesos de fabricación.

El **objetivo** del trabajo es explicar en detalle cómo se abordó el proyecto, cuáles fueron los problemas e imprevistos que surgieron durante el diseño y la fabricación teórica y cómo se solventaron.

Este trabajo consta de varios **capítulos**: Inicialmente se comentan aspectos teóricos de las bicicletas; los materiales empleados y aspectos básicos de las ruedas. A continuación se describe el diseño de la rueda, y modelizar simulaciones a través del ordenar en los campos de la aerodinámica y la resistencia de los materiales. Posteriormente se explicará el proceso de fabricación de la rueda. Finalmente se realizará una evaluación económica del proyecto.

1.1. Motivación

La empresa PROGRESS lleva varios años trabajando para hacer ruedas de carbono para ciclismo y triatlón, con la finalidad de que su producto sea reconocido mundialmente tanto a nivel profesional como amateur.

En principio esta marca confió en mí para ser un probador/corredor de Progress Cycles por mis últimos resultados en la disciplina del triatlón. A las pocas semanas le comenté al director general -la persona que se había ocupado de sponsorizar mi carrera deportiva- que tenía un proyecto en

mente para finalizar mi grado en la universidad. Qué mejor manera de hacer un proyecto en el que afición y estudios se unan para sacar el mayor rendimiento en ambas. El director de la empresa pareció interesado y accedió a ayudarme a llevar a cabo el diseño y fabricación de un modelo de ruedas. Desafortunadamente, al final no ha sido posible llegar a ningún acuerdo con la empresa.

La intención de este proyecto es hacer unas ruedas parecidas a las A-88, uno de los modelos que ya comercializa PROGRESS, y rediseñar este producto para hacerlo más competitivo.

1.2. Objetivos

El **principal objetivo** de este proyecto será rediseñar las ruedas A-88 de Progress Cycles para obtener un producto de mejores características.

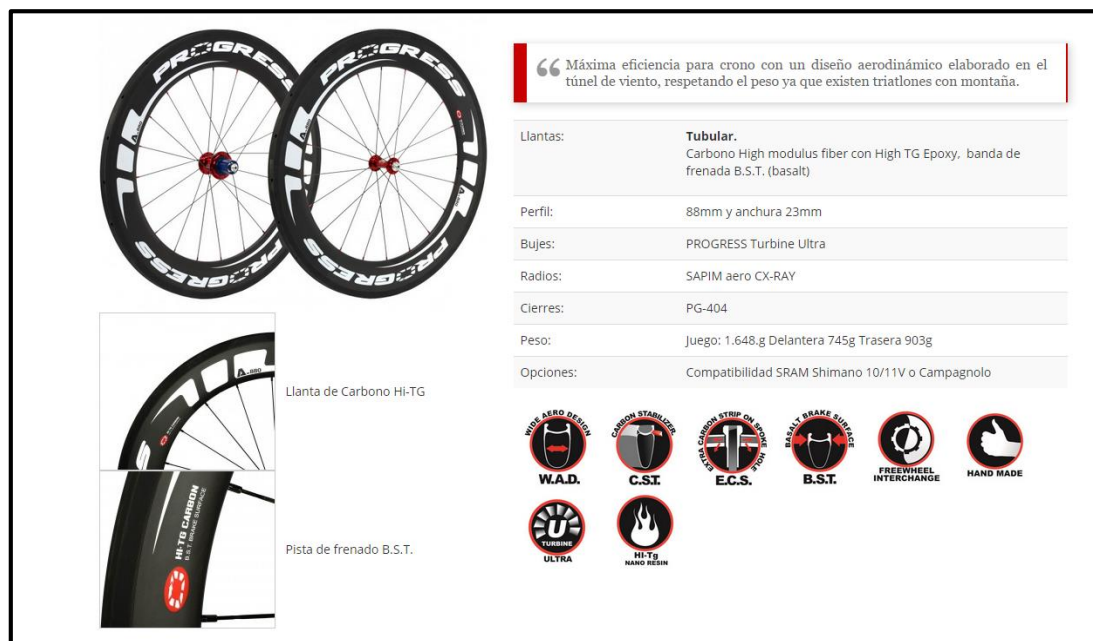


Figura 1. Ruedas Progress A-88. Fuente: Progress Cycles 2015

El PROTOTIPO-88 mantendrá las características básicas que tenía la anterior rueda, es decir, usando los mismos materiales pero con la idea de mejorar alguno de los aspectos deseados por la empresa, que son:

1. **Aerodinámica:** 20%.
2. **Resistencia:** 30 %. Entendemos como resistencia el tiempo que se mantiene la rueda sin desmejorarse, sin perder su funcionalidad como tal. Es decir, el tiempo sin que se rompa o que aparezcan desperfectos como la apertura de brechas en el carbono, la rotura de radios, descentramientos de la rueda, etc.
3. **Peso:** 30 %.
4. **Coste:** 20 %.

Los tres últimos conceptos van muy unidos, ya que normalmente si se aumenta el volumen del material se mejora la resistencia, pero paralelamente

aumenta el coste y el peso. Así que hay que estudiar la forma de sacar el mayor rendimiento a nuestro material compuesto, ya siendo: la manera de orientar las fibras de carbono, cambiando el tipo de resina, la calidad de nuestro material o el tipo fabricación.

Estos cuatro puntos son los más importantes que condicionarán que nuestro producto sea competente en el mercado. Se podrán mejorar estos puntos siempre y cuando se respeten las condiciones impuestas por la empresa.

Las **características** de nuestro prototipo son las siguientes:

- **Dimensiones del aro:**

- Ancho máx. exterior: 25-27 mm
- Radio curvatura: según el modelo del aro.
- Perfil 88 mm.
- Diámetro exterior: 622mm.

- **Material:**

- Fibra de carbono laminada de forma unidireccional.
- Recubrimiento de basalto en la zona de frenada para evitar que el carbono llegue a altas temperaturas.

1.3. Alcance

Este trabajo pretende realizar el diseño y fabricación teórica de una rueda de bicicleta con materiales composites, para que en algún momento se lleve a cabo su fabricación práctica.

Como parte del diseño teórico se intenta optimizar el modelo ya existente A-88 cogiendo como base sus medidas y parte de sus componentes: las medidas de los perfiles y radios, y como componente el buje. Dentro de este apartado se realizan las simulaciones aerodinámicas y estructurales tomando como referencia ensayos físicos realizados por empresas y por la Unión Ciclista Internacional (UCI). En el apartado del análisis estructural se dispone a encontrar la mejor configuración de radios y de laminado de fibra de carbono.

En el apartado de fabricación teórica, tomando como referencia información citada en la descripción del material y en el estudio estructural del aro con fibra de carbono, se realiza la fabricación con los parámetros previamente citados. Se desea optimizar el proceso de fabricación de la rueda, para obtener un mejor resultado en cuanto a la calidad del producto y una minimización de costes del proceso.

CAPÍTULO 2: ASPECTOS TEORICOS SOBRE LAS BICICLETAS

2.1. Historia

La historia del ciclismo, igual como la historia de todos los vehículos, ha ido unida a la evolución de los materiales y de la tecnología para poder construirlos.

Actualmente, en el mercado podemos encontrar bicicletas de distintos materiales:

1. Acero: se utiliza para fabricar ruedas, chasis, manillares, etc. Es el material más económico y más fácil de reparar en caso de ruptura de cuadro o de otras partes. Estas bicicletas son muy pesadas en relación a aquellas fabricadas con otro tipo de material.
2. Aluminio: Se utiliza para bicicletas de gama media, para hacer diversas partes de la bicicleta, es un material "económico" versus los dos materiales que se comentan a continuación. También existen distintos tipos de aluminio, como aluminio 7075, que pueden llegar a pesos similares a los de la fibra de carbono.
3. Titanio: se utilizó y se sigue utilizando para hacer algunas partes muy exclusivas de la bicicleta. Este material se utilizó en bicicletas de competición, cuando no existían las bicicletas de fibra de carbono. Actualmente, se siguen fabricando algunas bicicletas con titanio como la marca KLEIN, la marca pionera en la fabricación de bicicletas de titanio.
4. Fibra de carbono: el material más usado para las bicicletas de gamas altas tanto en *mountain-bike* como en bicicletas de carretera. Se puede fabricar

cualquier pieza con fibra de carbono: cuadros, manillares, ruedas... Las piezas fabricadas con este material compuesto suelen ser menos pesadas, más reactivas y absorben con mayor facilidad las vibraciones del terreno. Es el material del ciclismo de competición utilizado por excelencia. La fibra de carbono empezó a utilizarse en el ciclismo en la década de los 90's, en las grandes vueltas como el tour. Actualmente, las bicicletas de competición tienen un alto porcentaje de componentes, alrededor del 90%, están fabricados con fibra de carbono. Se utiliza este material por las características de rigidez versus peso. La UCI pone un límite mínimo de peso en las bicicletas de 6,7 Kg, aunque existen bicicletas que pesan alrededor de 4 Kg.

2.2. Descripción del material

(Márquez Linares J. 2015)

El material elegido para la fabricación del aro de la rueda ha sido un material compuesto, dentro de estos he elegido la **fibra de carbono con resina epoxy**. Por material compuesto se entiende una combinación a escala macroscópica de dos o más materiales con interfase entre ellos, para formar un nuevo material. El propósito de crear estos materiales es unir las características de los componentes que tienen por separado, y obtener un nuevo material mejor para la tarea específica que se pensó.

Existen multitud de materiales compuestos, pero los que nos ocupan en este proyecto son los dedicados a mejorar las características mecánicas, entre estos está la fibra de carbono. Este compuesto está formado por los filamentos de carbono recubiertos de una matriz polimérica. Con esta mezcla de materiales se pretende aprovechar la gran rigidez y resistencia del carbono mientras este está cohesionado con resina. De esta forma se consigue un sólido muy ligero y más elástico, si se compara especialmente con los materiales clásicos en estructuras para ruedas de ciclismo.

Tabla 1. Comparación de materiales compuestos vs. materiales metálicos.
 Fuente: Márquez-Linares J. 2015

Material	Fracción de volumen de fibra (V_f) %	Módulo de Elasticidad (E) (GPa)	Resistencia a la tracción σ_u (GPa)	Densidad ρ (g/cm ³)	Módulo específico (E/ ρ)	Resistencia específica (σ_u/ρ)
Acero		210	0.45-0.83	7.8	26.9	0.058-0.106
Aluminio		73	0.41	2.7	27.0	0.152
2024-T4		69	0.26	2.7	25.5	0.096
6061-T6	57	21.5	0.57	1.97	10.9	0.26
E-Fibra de vidrio-Epoxy	60	40	0.65	1.40	29.0	0.46
Kevlar-49-epoxy	58	83	0.38	1.54	53.5	0.24
Fibra de carbono-Epoxi	60	106	0.38	2.00	53.0	0.19
Boro-Epoxy						

La fibra de carbono puede trabajarse de varias formas, aunque la más habitual es en "pre-peg", traducido como un pre-pegado, que consiste en pre-impregnar las fibras de carbono con resina. En estas condiciones, el material se presenta en rollos con fibra dispuesta de forma unidireccional (con todas la fibras paralelas) o bien en tejidos (con las fibras entrelazadas).



Figura 1. Fibra de carbono unidireccional y bidireccional.
Fuente: Márquez Linares J. 2015

El proceso de curado consiste generalmente, en poner el material durante unas horas a una temperatura aproximada de 180°C (según el tipo de resina), usando una bolsa para hacer el vacío para eliminar el aire que pudiese quedar entre las capas apiladas, así como los gases generados durante el proceso de curación. Para este proceso se usa una máquina llamada autoclave, que controla el vacío, la presión y la temperatura durante el ciclo. La presión es un factor muy importante a controlar, ya que permitirá conseguir una mejor compactación de los materiales, y una mejor evacuación de los gases producidos por el proceso de curación. Para cada tipo de resina existe un ciclo específico, es decir, una temperatura, presión y tiempo diferente; con el fin de hacer un proceso más óptimo y conseguir unas mejores características mecánicas.



Figura 3. Autoclave Easton Wheel. Fuente: Easton Wheels 2012

Además, reseñar que este material requiere de unas condiciones de almacenamiento y uso especiales, más parecidos a la de un material biológico que a uno de construcción. Se trata de un material con fecha de caducidad, es decir, un tiempo después de ser fabricado deberá haber sido laminado y curado. Este tiempo suele ser de unos 6 meses, debiendo ser conservado durante este periodo en cámara frigorífica a bajas temperaturas, del orden de -18°C . En el momento en que se saca de dichas condiciones el tiempo de manipulación también está acotado, siendo de aproximadamente 250 horas. Si cualquiera de las dos restricciones anteriormente comentadas no se cumple, el material sufre cambios, que provocarían que las propiedades que se obtendrían después del proceso de curado serían peores de las que el proveedor proporciona en su hoja de características.

También la exposición a la radiación solar provoca un envejecimiento prematuro, y el contacto con algunos disolventes comunes lo deterioran. Por lo tanto, la fabricación ha de realizarse en un entorno controlado llamado "sala limpia", en donde la temperatura, presión, humedad, radiación y número de partículas en ambiente está controlado. Estos cuidados son fundamentalmente debidos a que el material se compone de resina sin curar, siendo necesario cumplir estas exigencias para que siga en ese estado.

Por último, comentar el aspecto económico de estos materiales; este material compuesto deja entrever una difícil obtención y una serie de operaciones complejas y duraderas, aumentando el coste de producción de las piezas que están hechas con este material. La obtención de estos materiales en sí ya son muy complejas y no existen muchos fabricantes que trabajen con este material. Es más, algunos de estos fabricantes trabajan para una o más marcas y guardan como un "secreto" los procesos de obtención. Para hacerse una idea, un rollo de "pre-preg" unidireccional con unos 36 m^2 de material tiene un coste aproximado de unos 3600€. Hay que tener en cuenta que no es sólo caro el material, sino que también la tecnología para la fabricación de los productos finales son muy caras: el coste de los consumibles para el vacío, el mantenimiento de las salas, la mano de obra especializada y los ciclos de curada.



Figura 2. Molde Bontrager. Fuente: Bike Sales 2013

2.3. Partes de una rueda de bicicleta

2.3.1. Aro

El aro es una sección de un perfil barrida en un círculo, que finalmente forma un aro como su propio nombre indica, donde están alojados los radios y la cubierta o tubular, y donde entran en contacto las zapatas de freno. Este componente recibe todas las fuerzas del suelo, y las aceleraciones y desaceleraciones. Podríamos decir que esta parte determina la tipología de la rueda. Se diferencian principalmente por su perfil, su peso y su inercia. Según el tipo de aro podemos encontrar:

- Aro escalador: Con muy poco perfil, entre 10-30 mm, y con una garganta más estrecha, reduciendo su peso y sus inercias. Ayudan a ascender mejor las montañas.
- Aro de media montaña: Con un perfil entre 30-60 mm, con una garganta más ancha que el anterior, este perfil permite una mayor aerodinámica e inercia, pero aumenta su peso. Es ideal para terrenos con partes llanas y de montaña, es un aro muy polivalente.
- Aro aerodinámico: Es un aro de un perfil superior a 60mm, con una garganta de entre 23-25mm. Se usa para pruebas de contrarreloj y no están permitidos en pruebas de ruta.
- Aro lenticular: Este aro está completamente tapado, es decir, no existen radios, de manera que es una rueda mucho más aerodinámica pero también más pesada.

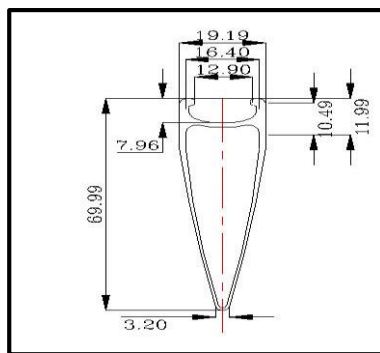


Figura 5. Forma aro en V.
Fuente: Mavic Catálogo 2010

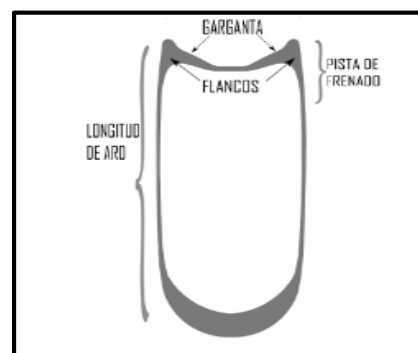


Figura 6. Forma aro en U.
Fuente: Zipp Catalogo Team
Bike España 2010

2.3.2. Radio

Es un elemento que se encarga de unir y transmitir las fuerzas desde el aro al buje. El material con el que se fabrican los radios suele ser acero, aunque también existen casos de radios de titanio y fibra de carbono. Existen infinidad de tipos de radios y formas de radiar una rueda.

Los radios pueden ser de cualquier forma y sección pero habitualmente son redondos, ovales o elípticos, e incluso ciertos fabricantes han usado perfiles NACA (como sección del radio). Tienen una dimensión característica, que es

la longitud del mismo, y las dos dimensiones que definen su sección transversal son bastante reducidas. El largo de los radios suele oscilar entre 15 y 30 cm, según la longitud del aro. La longitud máxima de alguna de sus dimensiones transversales no suele superar el centímetro de longitud.

A continuación se detallan los **tipos de radiado** (Brandt, J. 2006):

a) Radiado recto

Este radiado sólo se usa para ruedas delanteras. Es muy sencillo de fabricar y funciona perfectamente si el aro está bien construido. Algunas marcas como *Shimano* desaconsejan este tipo de radiado porque producen grandes tensiones en las alas del buje, pudiendo provocar la rotura de bujes de débil construcción. Al estar calcadas las cabezas de los radios por la parte externa del buje se crea mayor espacio entre la horquilla y el buje, además de añadir un "toque" estético más agradable.



Figura 7. Radiado recto.
Fuente: Jaivan 2011

b) Radiado Recto (Exterior)

Este radiado casi igual que el anterior, con la diferencia que las cabecillas de los radios pasan por el interior del buje. Este tipo de radiado es más efectivo en cuanto la rigidez lateral, uno de los puntos más importantes del radiado.



Figura 8. Radiado recto exterior. Fuente: Jaivan 2011

c) Radiado a dos cruces.

Es muy común en las ruedas de carretera. Cada pareja de radios está separada por dos orificios del ala del buje. Esto influye en una menor longitud de radio y menor peso.



Figura 9. Radiado a dos cruces. Fuente: Mavic 2015

d) Radiado a dos cruces/radial (rueda trasera)

Consiste en colocar un radiado recto en el lado izquierdo de la rueda, y un radiado de dos cruces en la parte derecha donde irá anclado el casete.

Hay muchos más tipos de radiados pero no son tan utilizados en carretera, simplemente porque aumentan el peso.



Figura 10. Radiado a dos cruces/radial.
Fuente: Mavic 2015

2.3.3 Buje

Es la parte central de la rueda, los radios salen del buje al aro. Es el punto de unión entre la rueda y la horquilla, por lo tanto, de la rueda y el resto de la bicicleta. Se compone de un eje, rodamientos y la carcasa exterior. Existe una distinción entre el buje de la rueda delantera y el de la trasera, debido a que la rueda trasera es la encargada de transmitir el movimiento de torsión al suelo a través de la cadena, que es solidaria al buje trasero. En cambio, el buje delantero únicamente debe permitir rotar con respecto a su centro, con la mayor facilidad posible, para obtener unas pérdidas por fricción mínimas.

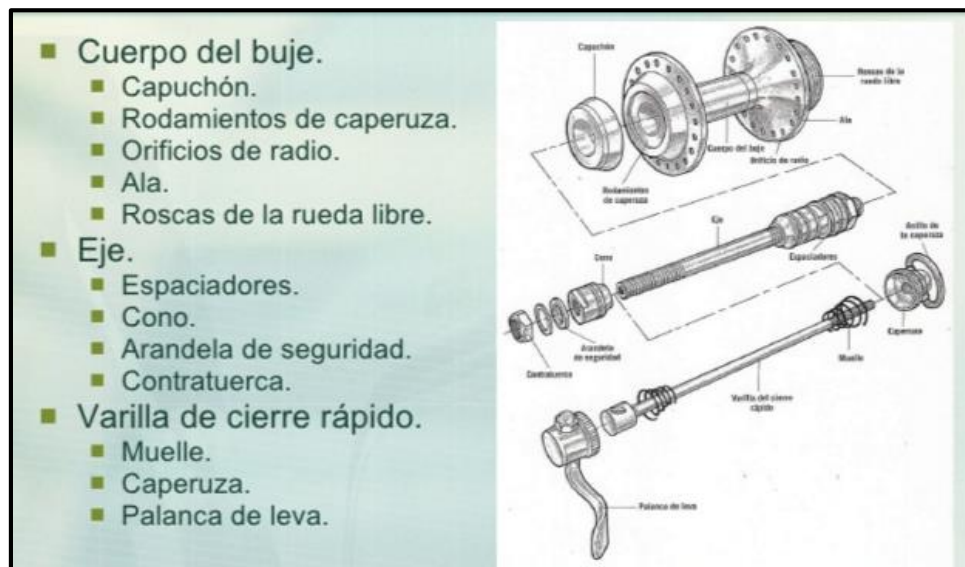


Figura 11. Partes de un buje. Fuente: Langley J. 2003

2.4. Restricciones de la rueda

2.4.1. Restricciones geométricas

La UCI determina una serie de medidas máximas y mínimas, para que las ruedas puedan competir en sus pruebas, que son el mayor exponente del ciclismo. En la referencia (Real Federación Española de Ciclismo 2005) podemos ver el artículo 1.3.018 donde cita las siguientes normas:

- **Diámetro:** El diámetro de las ruedas no será superior a 700 mm ni inferior a 550mm, incluyendo el neumático. Los neumáticos de carretera oscilan entre 30 y 40 mm. Para las ruedas de carretera es habitual utilizar la **normativa ISO 5775** sobre ruedas y usar un diámetro de 622mm.

- Radiado: Las ruedas que se utilicen en pruebas de ruta tendrán que tener como mínimo un número de 12 radios, donde estos podrán ser redondos, planos u ovalados. Los radios no podrán tener ninguna dimensión de su sección mayor a 10mm.

2.4.2. Test obligatorio

Para que estas ruedas puedan estar reconocidas dentro del mercado, para el uso de competiciones federadas o competiciones que acaten la normativa UCI, aparte de cumplir los requisitos geométricos, deberán pasar un **análisis de impacto** llamado *Sirris*. Este deberá ser realizado por una empresa autorizada por la UCI (Sirris 2007).

A continuación se expone el apartado 1.3 (pág. 249) del "Reglamento del deporte Ciclista" de la UCI (Real Federación Española de Ciclismo 2005):

Para ser aprobadas las ruedas deberán haber sufrido con éxito el test de ruptura prescrito por la UCI en los laboratorios autorizados por ella. Los resultados del test deberán demostrar que el aspecto externo de ruptura obtenida son compatibles con los resultantes de los choques producidos por una utilización normal de la rueda. Deberán ser cumplidos los siguientes criterios:

- *Durante el impacto, ningún elemento de la rueda podrá desprenderse y ser expulsado hacia el exterior.*
- *Los aspectos externos de la ruptura no podrán presentar partes con cortes al aire, cortantes o puntiagudos que puedan herir al usuario, a otros corredores o a terceros.*
- *Las partes externas de la ruptura no podrán anular la unión tubular-llanta del tal forma que la rueda no sea más sólida que la horquilla.*

El ensayo, de manera simplificada, consiste en una bancada fija donde se ancla el eje de la rueda y una segunda bancada desplazable que impacta contra la misma (ver figura 12).

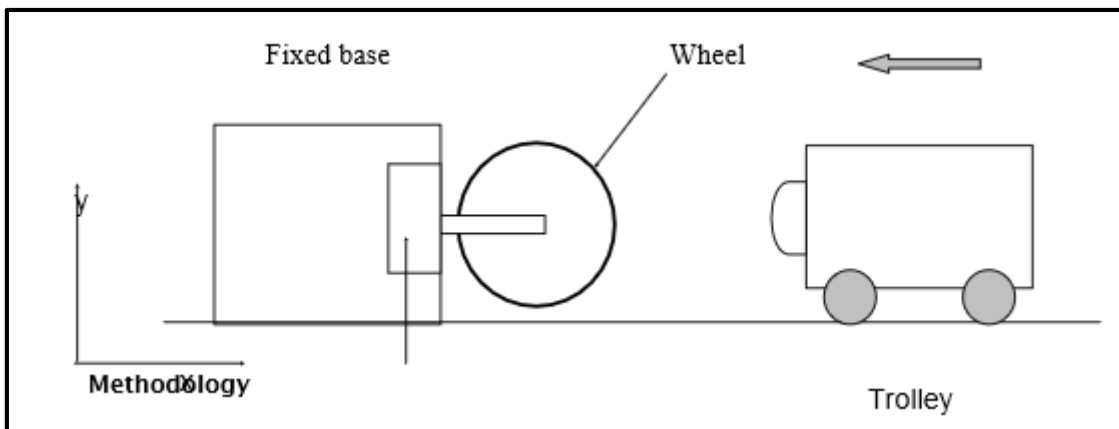


Figura 12. Banco de pruebas empresa. Fuente: Sirris 2007

El ensayo se realiza en unas condiciones atmosféricas estándar, es decir, 23°C y una humedad relativa del 50% según el **reglamento Europeo EN-62**.

Se deben realizar dos **tipos de impactos** (ver figura 13):

- Impacto I: Se realiza en el punto externo y medio del aro, estando la rueda en una disposición tal que un radio se encuentre de forma perpendicular a la herramienta de impacto.
- Impacto II: Se realiza para simular el efecto generado al pasar la rueda por un bache, bordillo o badén que exista en la carretera. Por lo tanto, la zona de impacto queda definida por la recta que pasa por dentro de la rueda y tiene un ángulo de 45° con la horizontal.

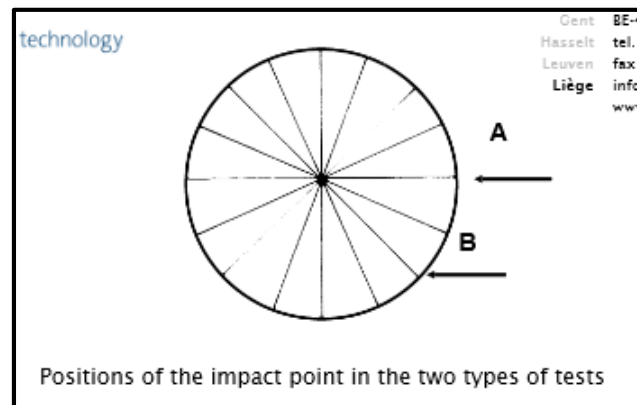


Figura 13. Zonas de impacto del martillo en las ruedas. Fuente: Sirris 2007

Con respecto a la **herramienta de impacto**, formada por el martillo y el carrito (ver figura 14 y 15):

- La velocidad del martillo en el momento del impacto es de 10 km/h.
- El conjunto tan solo se puede desplazar de manera horizontal antes y después del golpe por estar restringidos sus movimientos.
- El conjunto de la herramienta de impacto es de 100 kilos.
- La deformación del carro y el martillo son irrelevantes.
- El desplazamiento horizontal del carro está limitado, mediante dos topes en cada lado, para frenar la herramienta de impacto y que ésta no golpee a la bancada que sujeta la rueda. De esta forma se disminuye en cierta medida la cantidad de energía que debe absorber la rueda. En el reglamento de la UCI y los documentos de los diferentes laboratorios, no aparece especificado ni acotado cuáles serán los puntos donde se sitúen los topes, ni el recorrido que tendrá la bancada de impacto.

- La superficie de contacto entre el martillo y la rueda está definida. Esta superficie es redondeada. En la UCI o los diferentes laboratorios habilitados consultados, no se ha especificado un radio común a todos los test.

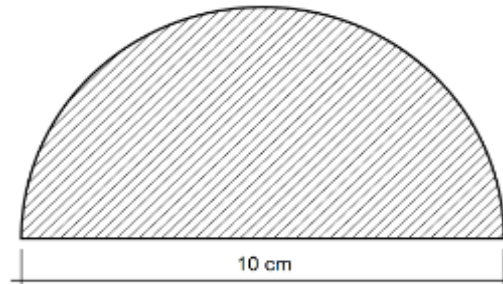


Figura 14. Vista transversal del martillo.
Fuente: Sirris 2007

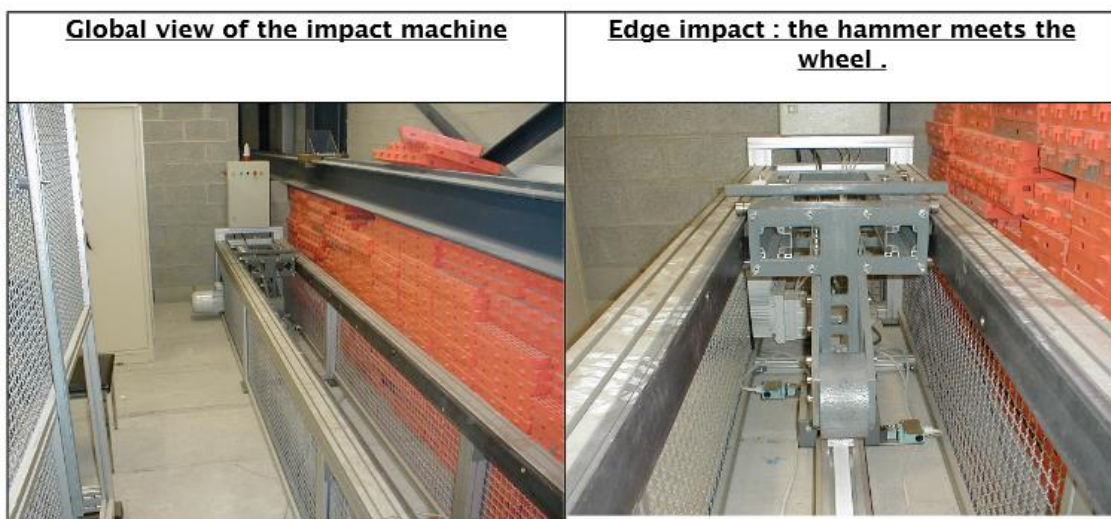


Figura 15. Máquina de impacto de la Empresa Sirris. Fuente: Sirris 2007

Con respecto a la **rueda** se deberán tener en cuenta las siguientes consideraciones:

La rueda dispondrá de un neumático montado con una presión de 7 bares, que es una presión media para los neumáticos de carretera. Existen diferentes tipos de neumáticos como son los tubulares o las cubiertas, que son los más comunes, y por último el tubeles. El tipo de neumático dependerá de la geometría que tenga el aro de la rueda para fijarlo.

Si la distancia entre dos radios consecutivos es de más de 20 cm, se deberán realizar cada uno de los ensayos de impacto en dos posiciones diferentes (UCI and Sirris 2013):

1. El punto de impacto debe coincidir con la proyección horizontal del radio sobre el aro.
2. El punto de impacto deberá ser la proyección del punto medio entre dos radios.

A través del contacto con la empresa PROGRESS, ésta ha confirmado que este ensayo se realiza de manera experimental, es decir, la complejidad de los elementos a analizar es tal, que no se realiza de manera computacional. Esta complejidad se debe a que por una parte hay que ver cómo se comporta el neumático una vez inflado a la presión indicada, y por otra, hay que observar la unión del neumático con la llanta (ya sea con pegamento si es tubular, o por unas muescas en el caso de la cubierta), siendo datos difíciles de integrar en el ordenador.

Aun teniendo estas recomendaciones, en este proyecto se harán las simulaciones, pero de manera estática, emulando las posibles fuerzas que encontramos.

Después de pasar los tests indicados anteriormente, la empresa publica los resultados de éstos, exponiendo las ruedas que han aprobado las pruebas (Sirris.2007).

2.5. Análisis de fuerzas que actúan sobre una rueda

Para poder garantizar el buen funcionamiento de nuestras ruedas, se debe entender su funcionamiento y las fuerzas que se aplicaran en ella. En este apartado se muestran las fuerzas que actúan sobre la rueda (Jaivan 2011) (ver figura 16):

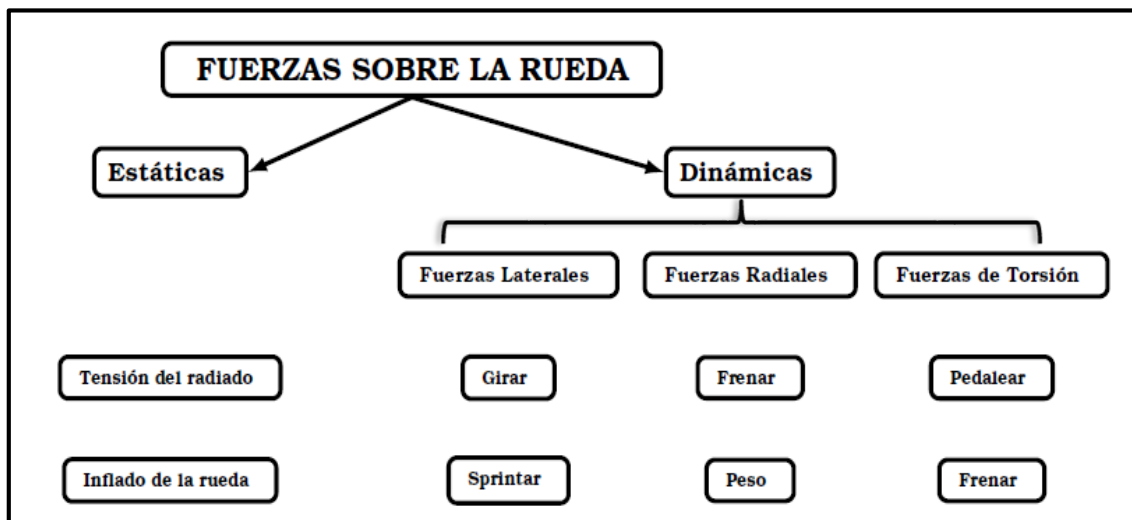


Figura 16. Esquema de fuerzas. Fuente: propia.

1. Fuerzas Estáticas

Son las fuerzas de pretensión de los componentes de la rueda, como los radios o la misma presión del neumático.

- Tensión del radiado (ver figura 17):

Los radios se deben tensionar para que no sean capaces de flectar ante una fuerza de compresión (por el peso, un golpe, un salto, etc). Hay 3 zonas sensibles a soportar dichas fuerzas: La primera de ellas es el radio. La tensión que adquiere cada radio, si es metálico, está comprendida entre los 500 y 2500 Newtons [16]. Por lo tanto, a parte del propio radio, se deberán tener en cuenta las otras 2 zonas sensibles, que son las zonas de unión del radio con el buje y el aro. Estas zonas son un punto de rotura bastante habitual.



Figura 17. Lector de tensión de los radios. Fuente: Bikepass 2011

- Inflado de la rueda:

Existirá una fuerza de compresión ejercida por todo el neumático (pudiendo ser tubular o cubierta) sobre el aro, que afecta al radiado. En la referencia (Barndt, J. 2006), se afirma que en un tubular o cubierta a una presión de 8.6 bares, el aro percibe una fuerza de 300 N. En comparación con la tensión de los radios, esta tensión es mucho menor en el caso del tubular, aunque sin llegar a ser despreciable.

2. Fuerzas Dinámicas

Las fuerzas dinámicas son causadas por frenar, pedalear, por el movimiento de giro de la rueda y por esprintar o pedalear de pie sobre la bicicleta. No se ha citado la fuerza gravitatoria causada por la masa del ciclista, debido a que está incluido en el movimiento de la rueda.

a) Fuerzas Radiales

Las fuerzas radiales son debidas en gran medida al peso del ciclista y del momento de frenado. Esta fuerza cobra vital importancia con la cantidad de ciclos que se realicen. En este apartado influyen mucho el tipo y la cantidad de radios. En este caso es necesario aplicar una fuerza muy elevada, del orden de 150-200 kg para deformar la rueda 1 solo milímetro (Brand, J. 2006).

b) Fuerzas laterales

- Fuerzas esprintando

Cuando un ciclista se encuentra sentado en la bicicleta pedaleando, las ruedas van perpendiculares al suelo. Ahora bien, cuando el ciclista se levanta y comienza a pedalear, comúnmente conocido como esprintar; se puede apreciar como las ruedas dejan de estar verticales (vista de frente) y esto es debido a una fuerza lateral, ejercida por el hecho de que el peso del ciclista va cambiando de un lado a otro (ver figura 18).



Figura 18. Ciclistas esprintando al final de una etapa. Fuente: Trek and Bontrager 2016

La distancia entre la llanta y las zapatas de freno oscila entre 2mm y 1cm. Por lo tanto, si las ruedas no son muy rígidas puede que la llanta roce con las zapatas haciendo que la bicicleta se frene. Esta fuerza suele oscilar entre los 100 y los 300 Newtons (Hull M. L. 1999), y se explicará con más detalle en los estudios estructurales.

- Fuerzas girando

La magnitud de la fuerza resultante es similar a la fuerza esprintando. Cuando hay que realizar un cambio de dirección es necesario inclinar la bicicleta y con ello las ruedas. Esta inclinación hace que aparezca una fuerza de reacción sobre el buje, debido a la fuerza que existe por el rozamiento con el suelo, en el componente tangencial al movimiento. Esta fuerza, al no estar compensada como en la de frenado, genera un momento, que tiende a doblar la rueda lateralmente. Esta fuerza dependerá de la velocidad a la que se realice el giro y la inclinación de la bicicleta.

c) Fuerzas de Torsión

- Fuerzas pedaleando

Cuando se ejerce una fuerza sobre los pedales, ésta es transmitida desde las bielas al conjunto de piñones, por medio de la cadena. Estos piñones van conectados al buje y ejercen un momento de torsión sobre éste. Esta fuerza afecta a la rueda trasera.

- Fuerza de frenado

Es la fuerza de fricción de las pastillas sobre la llanta. Esta fuerza es bastante despreciable respecto a las fuerzas comentadas anteriormente.

CAPÍTULO 3: ESTUDIO DE MERCADO

En este apartado, conoceremos las principales marcas y modelos más vendidos en el mercado de las ruedas de bicicleta de carretera.

Primero debemos saber que el comprador acabará adquiriendo un modelo de ruedas u otro por las siguientes razones:

- Marketing: Es muy importante promocionar el producto, ya sea mediante pruebas multitudinarias, o bien que nuestro producto lo lleve el corredor ganador, mostrándolo mediante medios de comunicación, sobre todo en redes sociales.
- Información al comprador: Dar datos claros que beneficien a nuestro producto, como el peso o la rigidez de la rueda. Dar a entender que con estas ruedas le será más fácil ganar que llevando otro producto rival.
- Conseguir puntos de venta del producto.
- Confeccionar un diseño muy atractivo.

3.1. Análisis de los modelos existentes en el mercado: marcas y modelos

Marcas como Bontrager, ZIPP o Mavic son las marcas que se conocen más en el mercado, y de las cuales hay más unidades vendidas por todo el territorio. En este apartado explicaremos las particularidades de cada empresa y de su producto.

3.1.1. Bontrager

La firma americana de *Bontrager*, fue la creadora de las ruedas conocidas como estándar de 26" desde 1985. En 1995 se unió con la marca *Trek* para llevar a cabo la fabricación de todos los materiales de accesorios y componentes para las bicicletas *Trek*, además de las ruedas.

Actualmente, esta marca trabaja con la mejor tecnología estadounidense. Cada temporada va innovando y realizando estudios para mejorar sus ruedas. Sus estudios están basados en las dos componentes: la fuerza de arrastre (DRAG) y la fuerza de empuje (YAW) (ver figura 19).

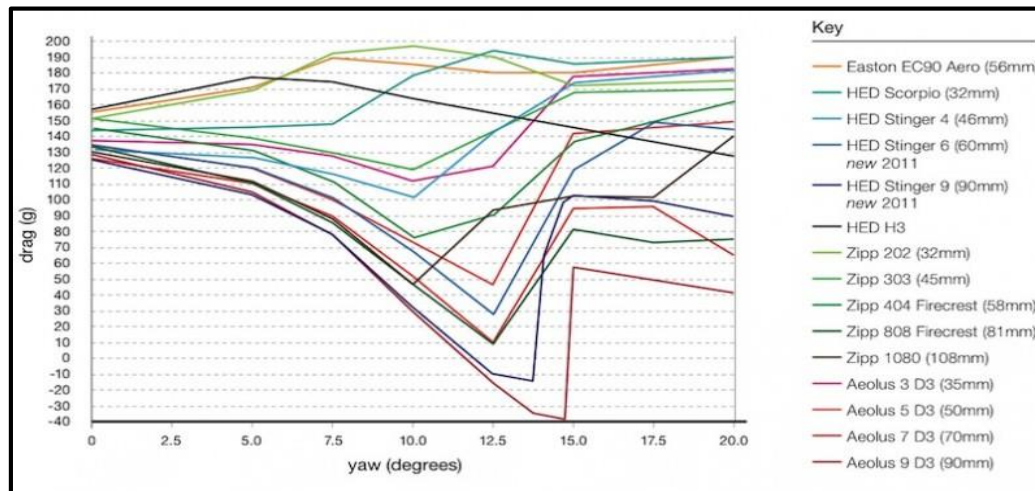


Figura 19. Gráfica comparativa de distintas ruedas vs. Bontrager.
Fuente: Trek and Bontrager 2016

Sus ruedas de gama alta son las *Aeolus*, con los distintos perfiles 30-50-70-90mm (ver figura 20). La principal característica de la serie *Aeolus*, es que se han realizado una serie de perfiles que finalmente han estado testados en el túnel del viento. Una de las características que estudia *Bontrager* con esta gama es el denominado D3 -Dual Directional Design-, que mejora el comportamiento del aire en el momento del contacto y en el momento de expulsión (Trek and Bontrager 2016).

Según los estudios publicados por esta marca, sus modelo *Aeolus* tiene un comportamiento aerodinámico mucho mejor que sus competidores ZIPP, HED o Mavic, siendo más aerodinámicas y ligeras que estas, y penalizando muy poco en terrenos con pendientes. Estas ruedas se diseñaron con bujes de fibra de carbono y radios DT Swiss, y con un aro ancho máximo 27mm formado por fibra de carbono OCLV con acabado unidireccional. El precio asciende a 1199€ la delantera y 1499€ la trasera, sumando un total de 2598€.



Figura 20. Rueda Bontrager Aeolus 9. Fuente: CDN Triathlete-Europe 2015

3.1.2. ZIPP

ZIPP es otra empresa estadounidense muy reconocida, que revolucionó el concepto de aerodinámica en sus ruedas, variando la geometría y la superficie de sus aros. Ésta aprovechó el concepto aerodinámico de las pelotas de golf, e imprimió las formas éstas en sus aros.



Figura 21. Rueda ZIPP 808. Fuente: Tiring 2012

Su variación en la geometría del aro se remonta a la década del 2000, donde muchas empresas apostaron por los beneficios aerodinámicos, y eso hizo que se cambiaran las formas del perfil del aro, desde los denominados tipo "V" hasta los tipo "U" actuales, que ZIPP denominó "Firecrest".

En el 2006 introdujeron en el mercado un tipo de aro con una superficie similar a la de las pelotas de golf (Team Bike 2009). Hicieron un estudio sobre cómo afecta la rugosidad al fluido, con el objetivo de crear una zona donde se modificara la capa límite de laminar a turbulenta, para que ésta fuera capaz de adherirse durante menos longitud, creando una estela mucho más pequeña.

3.1.3. Mavic

La firma francesa Mavic, trabaja realizando componentes de bicicletas, especialmente ruedas, desde 1889. No es extraño que sigan fieles a la geometría de su perfil en "V", signo de la identidad de sus ruedas. Aun así también han trabajado para tener unas ruedas muy competitivas. Mavic ha trabajado dos tipos de ruedas: ruedas súper-ligeras como la COSMIC ULTIMATE, una rueda "full carbon" que por ser una rueda de perfil 50, el set solo pesa 1100gr y también es bastante aerodinámica. Su estudio del acoplamiento neumático-rueda, denominada tecnología CX01, es una tecnología que esta implementada en todas las ruedas de la gama CXR.



Figura 22. Ruedas MAVIC COSMIC ULTIMATE. Fuente: Mavic 2015

A continuación detallo el argumento MAVIC CXR (Mavic 2015) "Sistemas neumático rueda CX0":

Más rápida en todos los sentidos. La tecnología Mavic CX01 presenta un Sistema Rueda-Neumático integrado que suaviza el paso del aire alrededor del neumático y de la rueda, mejorando la corriente laminar bajo cualquier

ángulo de ataque. Esto permite que las Cosmic CXR obtengan la menor resistencia aerodinámica entre todos los Sistemas Rueda-Neumático de carretera.

- *Minimiza las turbulencias en la unión llanta-neumático, disminuyendo la resistencia aerodinámica*
- *Permite ganar tiempo bajo cualquier ángulo de ataque*

CAPÍTULO 4: DISEÑO DE LA RUEDA

4.1 Diseño del aro

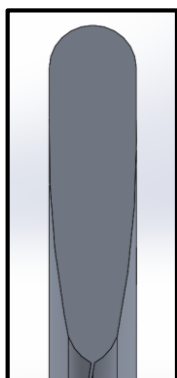
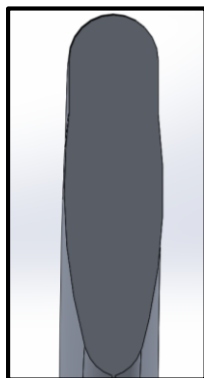
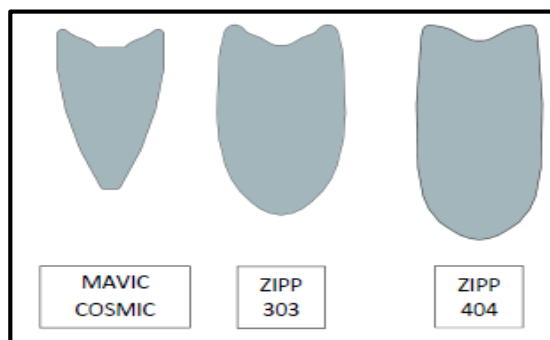
Como se ha citado en el apartado 2.3.1., existen dos parámetros básicos: la longitud del perfil y el ancho de la garganta. El primero de ellos no tiene una limitación, pero el segundo sí que la tiene, aunque no de manera directa. La UCI fija una anchura máxima del aro de 25 mm en la garganta. Usualmente siempre ha sido esta dimensión, pero en los últimos años ciertos fabricantes renombrados han modificado el ancho de su perfil, como son *Zipp*, *Hed* o *Bontrager*, que han fabricado aros con un perfil ovalado, donde el punto más ancho se situaba por debajo de la zona superior del aro, y la UCI lo ha permitido.

En este proyecto se diseñan 2 tipos de aro diferentes, entre los que hay anchuras distintas de perfil. En la tabla se muestran las dimensiones de cada modelo. A parte de las ruedas diseñadas, disponemos de las medidas de 3 ruedas que se comercializan actualmente, para poder compáralas con las nuestras (Team Bike 2009).

Tabla 2. Medidas aros a simular

Modelo	Ancho máximo(mm)	Perfil (mm)
Aro#1	25	88
Aro#2	27	88
Mavic Cosmic Ultimate	21.6	40
Zipp 303	24	45
Zipp 404	24	58

Hay que tener en cuenta el espesor del aro, y por ello se han utilizado de referencia diferentes aros de otras compañías. Como último paso, se realiza un redondeo en la zona de la garganta con el fin de ganar resistencia estructural, porque debido a las fuerzas térmicas generadas en el frenado, es una zona crítica. Fijando estos datos como variables fijas y modificando el ancho y el largo del aro se obtienen los diferentes modelos donde se muestra el área frontal.

**Figura 23.** Perfil n#1 88. Fuente propia**Fuente 24.** Perfil n#2 88. Fuente propia**Figura 25.** Perfiles ruedas Mavic y Zipp. Fuente propia.**Figura 26.** Mavic Cosmic Carbon Ultimate. Fuente: Mavic 2015**Figura 27.** Zipp Firecrest 303. Fuente: ZIPP 2016**Figura 28.** Zipp Firecrest 404. Fuente: ZIPP 2016.

4.2. Elementos normalizados

4.2.1 Radios

Se utilizarán radios de forma ovalada y redonda. Usualmente los radios metálicos redondos tienen un diámetro de 2 mm, por lo que habrá que realizar los estudios con unas dimensiones similares. Se han elegido radios de la marca DT SWISS (Dt Swiss 2016):

- Modelo del radio: *DT areolite*.
- Geometría (ancho x alto): 2,3 x 0,9 mm.
- Peso: 4,34 gr cada radio.



Figura 29. Radio DT SWISS Aerolite. Fuente: DT SWISS 2016

La **elección** de estos radios se fundamenta en la confianza que ofrece esta gran marca DT Swiss, que es la mayor marca de fabricación de radios y bujes del mundo. Se ha elegido este modelo porque aparte de ser un radio plano y con bastante anchura, tiene un peso excepcional que no compromete la rigidez de la rueda.

El precio de coste es de alrededor de 0,6 € por radio y a PVP salen 3,5 €.

4.2.2 Buje/eje

El modelo elegido es el buje *Progress Turbine*. Es un elemento que no tendrá demasiada importancia en el análisis de simulaciones, ya que estos bujes ya están testados y comprobados por sus fabricantes (Progress Cycles 2015).



Figura 30. Buje delantero Progress turbine. Fuente: Progress Cycles 2016.

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS AERODINAMICO

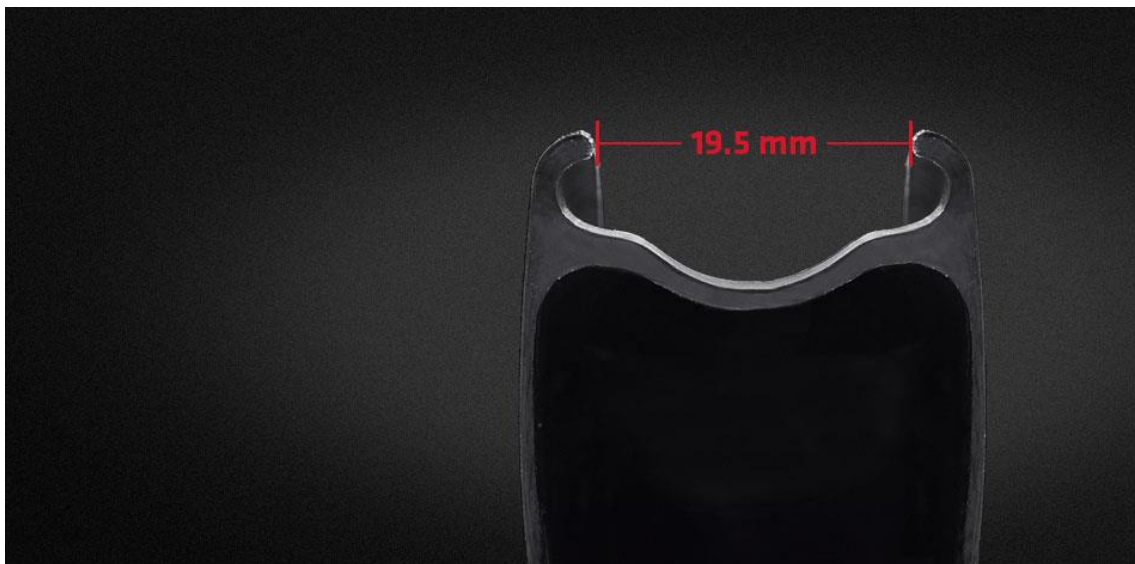


Figura 31. Aro Bontrager Fuente: Bontrager 2015.

En el presente capítulo se explica el estudio aerodinámico que se ha realizado para obtener la geometría exterior del aro. Se describe cómo afecta al estudio el viento relativo en la bicicleta. Posteriormente, se citan los parámetros utilizados en las simulaciones que se han llevado a cabo.

Seguidamente se habla de los diferentes modelos de rueda que se utilizan en el estudio y de la idealización de la geometría. Después se analiza tanto el dominio de estudio, como la convergencia de malla, para poder mostrar los resultados, y poder obtener las conclusiones necesarias para fijar la geometría final exterior del aro. Para este estudio se utilizará el módulo de simulación avanzada, del software *ANSYS Fluent* y *Solidworks Flow Simulation* (Mechanical tutorials 2015; Karman V. 2015; Mubashir A. 2015; Ali Rodriguez A. Y. 2014).

Este concepto es muy importante para nuestra rueda, ya que este tipo de rueda se usa normalmente para carreras de contrarreloj o triatlones de larga distancia, donde cada segundo cuenta. En estas competiciones el corredor no puede hacer "drafting", es decir, ir a rueda (que puede llegar a suponer una disminución de hasta un 30 % del esfuerzo para al corredor que va detrás), por lo tanto, el concepto de aerodinámica suele ser muy importante para poder sacar mayor rendimiento al corredor.

5.1. Conceptos generales

Queremos que nuestro perfil genere una capa límite pequeña, que gran parte de ella trabaje como flujo laminar y que genere una estela lo más pequeña posible. Esto vendrá determinado por el ángulo de ataque, las medidas del aro y la superficie de la pieza. Estas características harán que varíen las fuerzas aerodinámicas, determinadas por los coeficientes aerodinámicos que se comentaran en este apartado.

Se ha trazado el perfil de las A-88 y se ha estudiado en un software de simulación que permite analizar las principales mejoras.

Las propiedades que definen una mejor aerodinámica de la pieza son:

- La sección geométrica, es decir: su forma, longitud y anchura.
- La superficie de la pieza con la cual tendrá contacto nuestro fluido, en este caso el aire, que desprenderá la capa límite, creando una mayor o menor estela de turbulencias.

Entramos primero en la sección geométrica; hemos podido observar que antiguamente existía la creencia de que contra más delgado fuera el perfil, menos superficie de contacto con el viento y menos fricción había. A la vez que esta teoría es cierta, hay que buscar una anchura óptima que permita que el conjunto del perfil de la rueda saque el mejor rendimiento. En los últimos años han aumentado tanto la anchura del neumático como la anchura de la llanta. Esto lo han realizado dos grandes marcas que durante estos años han aumentado la sección de ruedas, y que según sus estudios realizados con CAD y CFD, y luego exportados en el túnel del viento, los resultados han sido positivos.

5.1.1 Viento relativo

Para realizar este estudio hemos cogido como ejemplos los estudios de las marcas más destacadas del mercado. En el siguiente video [33], podemos ver como se lleva a cabo el siguiente estudio aerodinámico. Se fija la bicicleta por las ruedas, que descansan sobre una plataforma con rodillos que las hacen girar a la velocidad deseada. Esta plataforma permite dar una orientación a la bicicleta ya que al ventilador del túnel de viento no se le puede dar rotación.



Figura 32. Test túnel del viento Trek Speed Concept. Fuente: Road Bike Action Magazine 2015

Los parámetros que hay que tener en cuenta en los estudios aerodinámicos es la velocidad, ángulo de incidencia y tipo de **flujo de viento** que recibe la rueda. Para este último, se define el flujo en el caso ideal, es decir, no perturbado.

Queda por definir la **velocidad** y el **ángulo de incidencia**. En carreras profesionales las medias suelen estar situadas en torno a 40 km/h. Si el terreno es llano, esta velocidad será superior y si es montañoso será menor. Algo que no es constante es el viento, ni en magnitud ni en dirección. Por el hecho de que la bicicleta, y por tanto la rueda, se encuentra en movimiento, el ángulo de incidencia del aire que ve la rueda no tiene por qué ser el mismo que el del viento. Para estos estudios, siguiendo la línea del resto de estudios hallados, se ha dejado la rueda fijada por su eje, es decir, la rueda se encuentra girando respecto a su centro.

Partiendo de que en las carreras profesionales la velocidad de los ciclistas se sitúa entorno a los 40 km/h, fijaremos esta velocidad a la rueda en un lugar fijo. Por tanto, el centro de la rueda será nuestro punto de referencia y en ella se situará nuestro eje de coordenadas. En cambio, las otras variables que tenemos - la velocidad del aire y su ángulo de incidencia -, son un parámetro totalmente cambiante en el transcurso de una carrera de ciclismo. Es verdad que sí que se puede prever según la etapa y la orografía del lugar un tipo de rueda u otro, pero en lo que viene a ser el control de las velocidades del viento y el ángulo de incidencia solo se podrán controlar en un laboratorio. De esta manera se probarán distintos flujos de aire con distintas velocidades y distintos ángulos de incidencia. El funcionamiento de la rueda

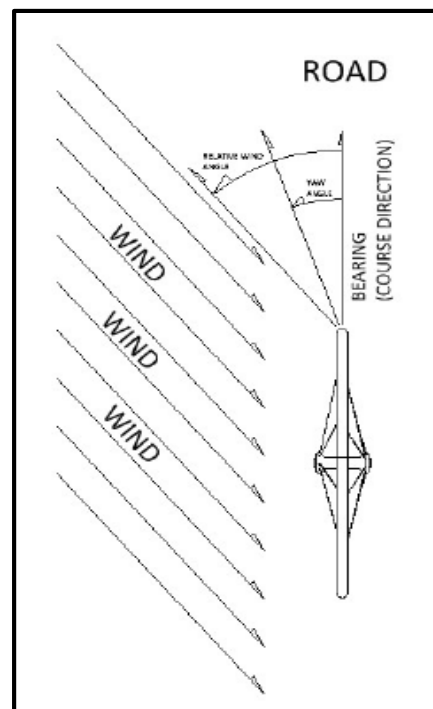


Figura 33. Componentes aerodinámicas sobre la bicicleta. Fuente: Reynolds 2012

en movimiento al entrar en contacto con el viento, es como el de un rodete de una turbo máquina. De esta manera, es necesario la utilización de un triángulo de velocidades (ver figura 33) y el cálculo de las distintas velocidades (vel. flujo, vel. rodete, vel. relativa).

El concepto de viento relativo es la magnitud y dirección que recibe un objeto en movimiento envuelto en una corriente de aire definida en dirección y magnitud. En el caso que nos confiere se tiene como parámetro la velocidad del viento, debido a la facilidad de obtención de sus valores, y la velocidad lineal de la rueda.

A continuación se expone la tabla 3, con las variables del triángulo de velocidades y la tabla 4, con los datos de la simulación.

Tabla 3. Variables triangulo de velocidades

Variable	Significado
Vb	Velocidad rueda
Vw	Velocidad viento (absoluta)
Alfa	Angulo de incidencia del viento
U	Velocidad relativa (absoluta)
Uh	Velocidad relativa horizontal
Uv	Velocidad relativa vertical

Tabla 4. Datos de simulación

Variable	Datos
Vb	40 km/h
Vw	0-10-10-15 km/h
Alfa	0-30-55-56
U	Calcular
Uh	calcular
Uv	calcular

- Definición ecuaciones:

$$U_h = V_b - V_w \cdot \cos(\alpha)$$

$$U_v = V_w \cdot \sin(\alpha)$$

$$U = \sqrt{U_v^2 + U_h^2}$$

- Definición triángulo de velocidades:

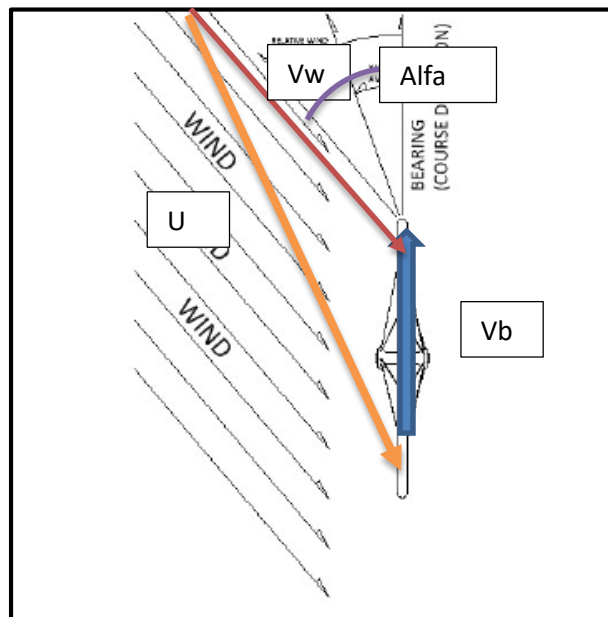


Figura 34. Triángulo de velocidades. Fuente propia

Finalmente, con estos datos queremos conocer la fuerza de carga aerodinámica que realiza el aire al impactar con nuestra rueda. La fórmula para el conocimiento de esta fuerza es:

$$D = \frac{1}{2} C_d \rho V^2 S$$

D- Resistencia. Se utiliza la "D" por el término inglés drag (arrastre).

ρ - Densidad del fluido

V - Velocidad

S - Superficie alar en planta

C_d - Coeficiente aerodinámico de resistencia

En este caso, no somos ni podemos ser conocedores del C_d -coeficiente de resistencia aerodinámico-, ya que para ello es necesario un determinado software. Es cierto que existen formas geometrías tabuladas conocedoras del C_d . Este coeficiente, que es directamente proporcional a la fuerza de resistencia aerodinámica, es la razón de este apartado. Contra menor sea este C_d , mejor penetración tendrá nuestra rueda en el viento y menor será la fuerza.

Una vez vistas las velocidades con las que trabajará nuestro fluido (aire); calcularemos el número Reynolds:

$$Re = \frac{vs D}{v}$$

Vs: Velocidad del fluido (m/s)

D: longitud que atraviesa el fluido (m)

V: viscosidad cinemática del fluido (m²/s)

$$Re = \frac{vs D}{v} = \frac{11,1 \cdot 0,088}{1,51 \cdot 10^{-5}} = 64688 = 6,5 \cdot 10^4$$

Al entrar en contacto el flujo de aire (laminar sin estar perturbado), se convierte en flujo turbulento. Esto se debe a que la viscosidad dinámica el aire es muy baja, y las velocidades son bastante altas.

5.2. Parámetros a estudio

En la industria de la bicicleta ninguna marca quiere desvelar sus estudios, ni las formas de sus perfiles. En muchas revistas de ciclismo se muestran estudios "*sin números*", es decir, sin datos de los que se pueda llegar a corroborar su validez.

Al decir "sin números" se quiere indicar que no muestran datos como la velocidad del viento o el ángulo de incidencia de este, pero sí que puede exponerse por ejemplo, que con determinado modelo de ruedas, se pueden bajar 10 segundos cada 40 km gracias a su aerodinámica. En pocas palabras, las empresas hacen "mucho marketing" con lenguaje muy técnico, que para la mayoría de usuarios es atractivo. Visualmente las ruedas son bonitas, y cuando se hace referencia al túnel del viento quiere decir que se ha invertido bastante dinero en este modelo (Feiereisen B. 2011).

Por suerte se ha comparado nuestro estudio con 3 modelos de ruedas ya existentes en el mercado, que anunciaremos a continuación. Los tres modelos

también han realizado los mismos estudios con los mismos parámetros que usaremos.

- **Simulación aerodinámica**

En este estudio se evaluarán 4 casos para cada modelo de rueda. En la tabla 5 se pueden observar casos de estudio. He elegido estos valores porque los modelos a comprar se habían hecho con estos parámetros.

Casos de estudio

Tabla 5. Casos de simulación

N#	Vb	Vw	Alfa	U	Uh	Uv
1	40	0	0	40	0	40
2	40	10	30	48,91	5	48,66
3	40	10	55	46,49	8,19	45,77
4	40	15	56	50,12	12,28	48,60

En el capítulo de diseño, se ha definido la geometría de los diferentes modelos de aro.

En este estudio sólo se analiza la geometría exterior de la rueda ya explicada en el capítulo anterior, ya que es la parte que construimos y que generalmente se estudia en estos casos, al ser la pieza que genera mayor resistencia al aire. Aún así, los fabricantes de radios, bujes, cubiertas y tubulares de alta gama, también realizan estudios similares para sacar el mayor rendimiento de estos productos.

En lo que hace referencia al aro, detrás de esta forma geométrica marcada hay muchas horas de búsqueda de información sobre perfiles de ruedas. Para ello han sido de gran ayuda los consejos del profesor de ingeniería de fluidos de cursos anteriores, orientándome sobre el funcionamiento de la rueda y la similitud entre el rodete de turbomáquina y una rueda de bicicleta; además, existe un gran desarrollo en los perfiles de alas para aviones denominados perfiles NACA, donde también he podido extraer mucha información (Vidal J.R.).

Se han estudiado perfiles de otras marcas y modelos diferentes de ruedas, y entre la suma de ellas, se ha acabado de ajustar los dos perfiles deseados.

- **Idealización de la geometría:**

Una vez definidas las geometrías de nuestro estudio, es necesario idealizarlas con el fin de reducir tiempo de simulación y posibles problemas que difieren a nuestro estudio, como es el caso de la elección de la cubierta o el tubular que se acoplarán en el aro a que nosotros no elegiremos el tipo. Muchas marcas trabajan sobre el acoplamiento neumático-rueda para mejorar el rendimiento aerodinámico.

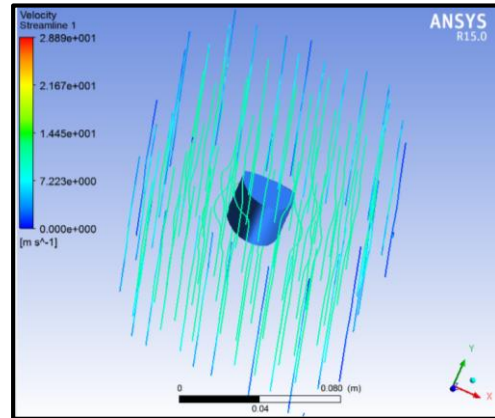


Figura 35. Penetración del perfil de velocidades. Fuente: propia

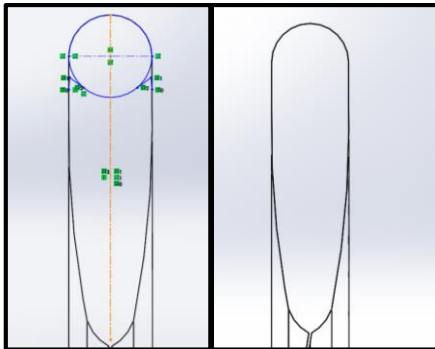


Figura 36. Idealización del perfil. Fuente: propia

5.3. Definición del dominio del estudio

Para poder definir el dominio del estudio, es necesario crear en nuestro programa una especie de túnel de viento. En este caso el túnel en cuestión que podemos ver en la figura 37, es una extrusión de un rectángulo con unas medidas determinadas, referenciado con primer volumen de control. Seguidamente tenemos que crear un segundo volumen de control más cercano ya a la geometría de nuestra rueda, ya que este será el volumen de control rotativo que girará junto a nuestra rueda (ver figura 38).

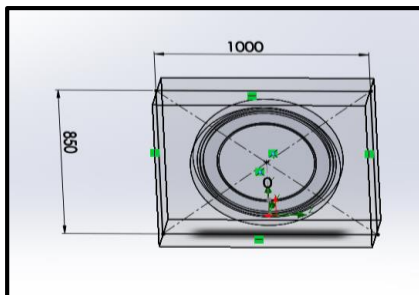


Figura 37. Volumen de control. Fuente: propia

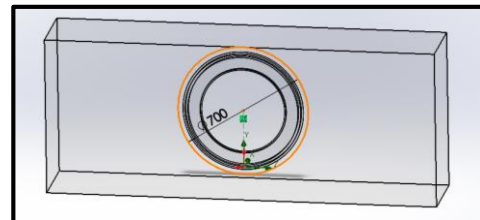


Figura 38. Volumen de control rotativo. Fuente: propia

- **Módulo de mallado.**

Al solamente querer estudiar el efecto de la rueda sobre el fluido y viceversa, se malla la superficie exterior de la rueda con elementos 2D, ya que el software lo realiza de esta forma automáticamente. Esto se hace debido al ahorro de tiempo de cálculo, pero en cambio no se pueden estudiar los efectos del fluido sobre la rueda. Es decir, no se puede estudiar si debido al fluido la rueda sufre deformaciones en algún punto. Para el caso del estudio esto carece de relevancia porque se realizarán estudios estructurales de la rueda para estudiar sus deformaciones con un alto coeficiente de seguridad. Este estudio se centra en la importancia del DRAG que genera la rueda.

Se utiliza por tanto una malla 2D con un elemento triangular de 3 nodos, debido a que el software detecta que este tipo de elemento es el que mejor se adapta a la geometría. Además, el software sugiere un tamaño de elemento al analizar la geometría, que se utilizará como punto de partida para el estudio (Ali Rodríguez A. Y. 2014).

- **Flow simulation**

Una vez definidos los dominios y parámetros de nuestro estudio, ya podemos realizar las simulaciones. Para la creación de nuestra simulación seguiremos estos pasos:

1. Definir proyecto: Definición del nombre y tipo de proyecto (ver figura 39).

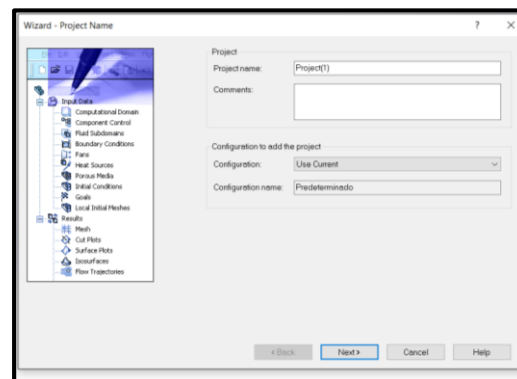


Figura 39. Definición de proyecto. Fuente: propia

2. Definición de sistema de unidades en SI y determinación de decimales de las variables (ver figura 40).

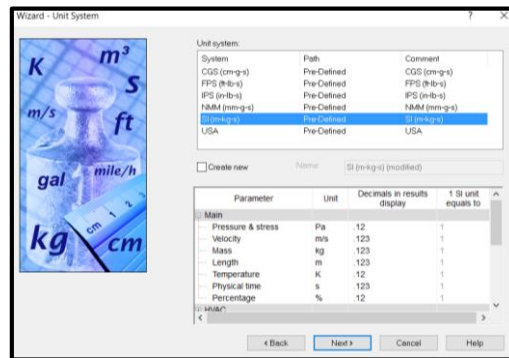


Figura 40. Definición de unidades.
Fuente: propia

3. Definición del tipo de análisis: en este caso, es una simulación de túnel de viento, se realiza como un análisis interno y se excluyen las cavidades de nuestro aro. Se marca la casilla de rotación, ya que nuestro aro rodará, y tomamos como referencia para nuestra rotación el eje x (ver figura 41).

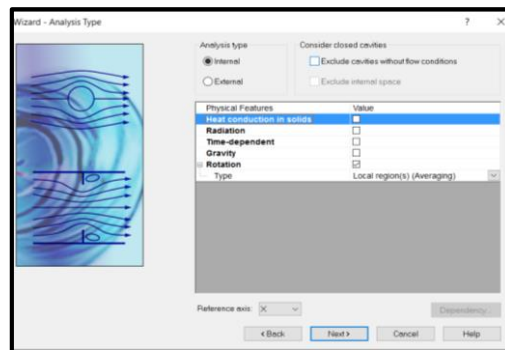


Figura 41. Tipo de estudio

4. El fluido del que se dispondrá en el ensayo será aire a condiciones de laboratorio (ver figura 42).

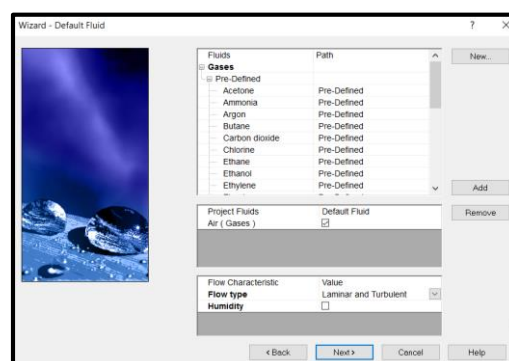


Figura 42. Triángulo de velocidades. Fuente: propia

5. Nuestras piezas en contacto con el fluido son adiabáticas (ver figura 43).

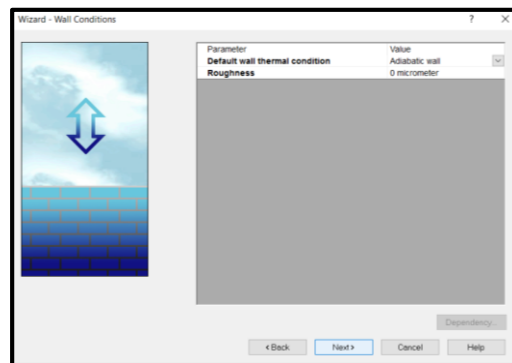


Figura 43. Condiciones del sólido. Fuente: propia

6. Las condiciones iniciales de presión y temperatura de nuestro fluido son siempre las mismas en todos los casos, y solo se variarán las velocidades (ver figura 44).

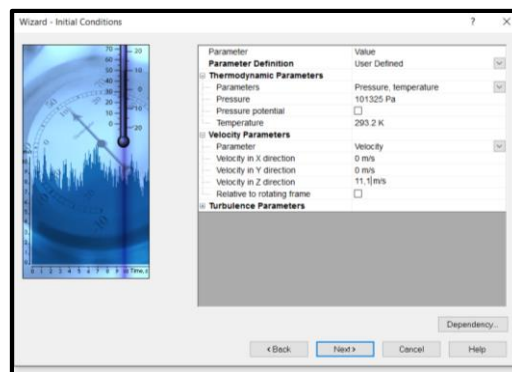


Figura 44. Condiciones iniciales. Fuente: propia

7. Definición de la malla: se puede seleccionar para unas primeras pruebas un mallado automático. Se comprueba que con este tipo de mallado recomendado por el software, convergerán con igualdad todos los casos. Se realizan varias pruebas con una malla más refinada que exige mayor capacidad de cálculo. Finalmente, comprobamos que muestran los mismos resultados. Elegimos la malla recomendada por el software (ver figura 45).

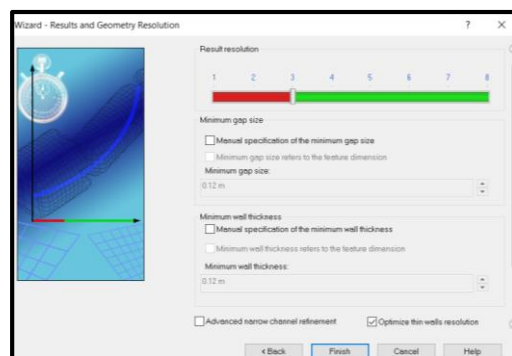


Figura 45. Mallado. Fuente: propia

Una vez ya está creado el estudio hay que definir varios parámetros:

1. Nuestra sección rotativa: En este caso rotará nuestro aro en su volumen de control rotativo. Su velocidad tangencial será de 40 km/h, que se convierte en velocidad de rotación de 35,69 rad/s (ver figura 46).

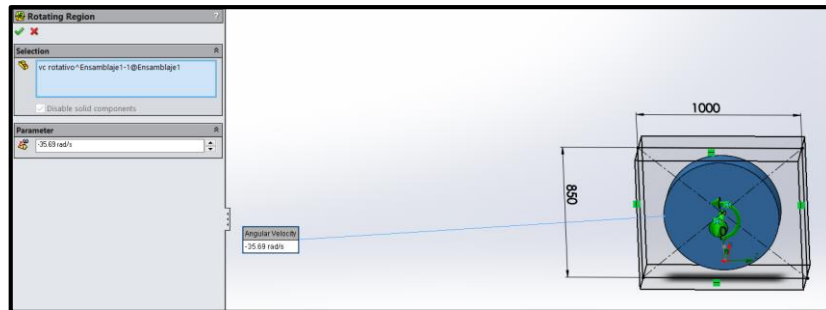


Figura 46. Velocidad de rotación. Fuente: propia

2. Determinar los límites de volumen de control y designar sus caras (ver figura 47).

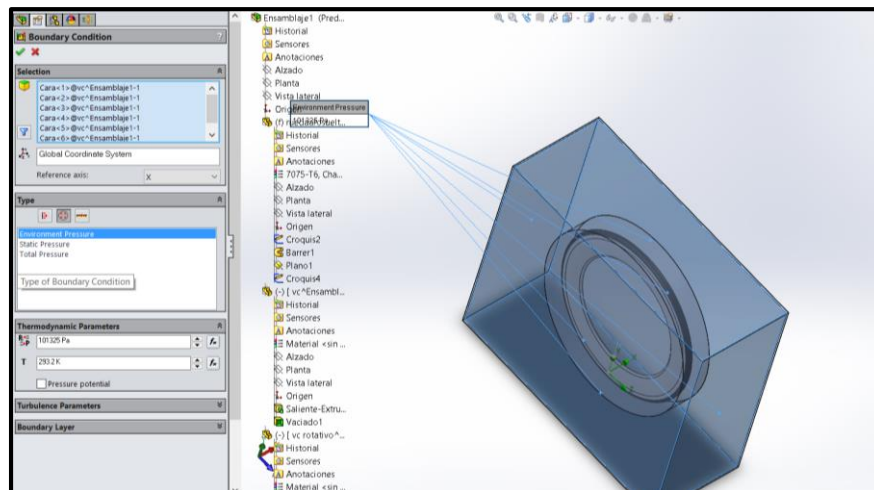


Figura 47. Límites del volumen de control. Fuente: propia

3. Antes de poner en marcha la simulación hay que buscar qué resultados queremos visualizar (ver figura 48).

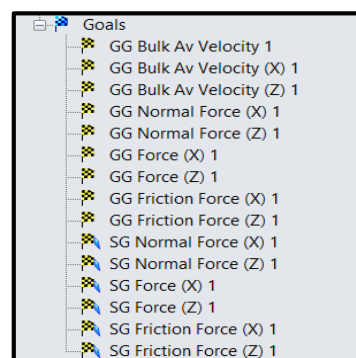


Figura 48. Visualización de resultados. Fuente propia

Nota: GG serán los resultados en el volumen de control, y los SG serán los resultados en la superficie del aro.

5.4. Resultados

5.4.1. Simulación del Aro 1

• **Caso 1**

- Velocidad rueda 40 km/h = 11,1 m/s
- Vel. Viento : 40 km/h = 11,1 m/s
- Angulo = 0 °
- Drag en z : 2,82 N
- Fricción superficie rueda en Z : 0,0152

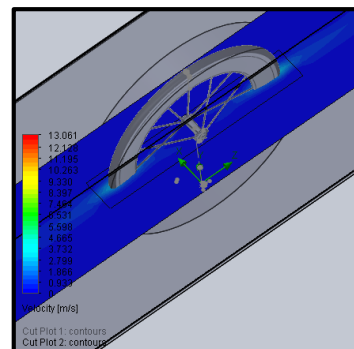


Figura 49. Rueda en el volumen de control.

Fuente: propia

SG Friction Force (X) 1	0.000453694 N	Achieved (IT = 80)	0.000583615 N	Checking criteria
SG Friction Force (Z) 1	-0.000332747 N	Achieved (IT = 41)	0.0152117 N	Checking criteria
SG Normal Force (X) 1	0.0203712 N	Achieved (IT = 40)	1.9341 N	Checking criteria
SG Normal Force (Z) 1	7.83138e-006 N	Achieved (IT = 40)	2.82002 N	Checking criteria

Figura 50. Caso 1 aro 1. Fuente: propia

• **Caso 2**

- Velocidad rueda 40 km/h = 11,1 m/s
- Velocidad del viento= 10 km/h
- Angulo= 30 °
- Vel. Viento : z: 48,66= 13,52 m/s x: 5 = 1,38 m/s
- Drag en z : 1,626 N
- Fricción superficie rueda en Z : 0,022 N

SG Friction Force (X) 1	0.0002936 N	Achieved (IT = 98)	0.000430515 N	Checking criteria
SG Friction Force (Z) 1	0.000601735 N	Achieved (IT = 47)	0.0221389 N	Checking criteria
SG Normal Force (X) 1	0.0737953 N	Achieved (IT = 47)	4.2818 N	Checking criteria
SG Normal Force (Z) 1	-3.05532e-005 N	Achieved (IT = 40)	1.62649 N	Checking criteria

Figura 51. Caso 2 aro 1. Fuente: propia

- **Caso 3**

- Velocidad rueda 40 km/h = 11,1 m/s
- Velocidad del viento = 15 km/h
- Angulo = 55 °
- Vel. Viento : z: 45,77 = 12,71 m/s x: 8,19 = 2,27 m/s
- Drag en z : 1,48 N
- Fricción superficie rueda en Z : 0,0196 N

SG Friction Force (X) 1	1.32589e-005 N	Achieved (IT = 107)	0.00043078 N	Checking criteria
SG Friction Force (Z) 1	-0.000766701 N	Achieved (IT = 47)	0.0196524 N	Checking criteria
SG Normal Force (X) 1	-0.0253354 N	Achieved (IT = 40)	4.60114 N	Checking criteria
SG Normal Force (Z) 1	-0.000133051 N	Achieved (IT = 40)	1.48103 N	Checking criteria

Figura 52. Caso 3 aro 1. Fuente: propia

- **Caso 4**

- Velocidad rueda 40 km/h = 11,1 m/s
- Velocidad del viento = 15 km/h
- Angulo = 56 °
- Vel. Viento : z: 48,60 = 13,5 m/s x: 12,28 = 3,41 m/s Angulo = 56°
- Drag en z : 0,264 N
- Fricción superficie rueda en Z : 0,0054N

SG Friction Force (X) 1	0.000110952 N	Achieved (IT = 121)	0.000375266 N	Checking criteria
SG Friction Force (Z) 1	0.000103685 N	Achieved (IT = 47)	0.00540453 N	Checking criteria
SG Normal Force (X) 1	-0.022724 N	Achieved (IT = 59)	1.00341 N	Checking criteria
SG Normal Force (Z) 1	-1.74753e-005 N	Achieved (IT = 40)	0.26434 N	Checking criteria

Figura 53. Caso 4 aro 1. Fuente: propia

5.4.1. Simulación del Aro 2

- **Caso 1**

- Velocidad rueda 40 km/h = 11,1 m/s
- Velocidad viento = 0 km/h
- Vel. fluido : 40 km/h = 11,1 m/s
- Angulo = 0 °
- Drag en z : 3,10N
- Fricción superficie rueda en Z : 0,016N

SG Friction Force (X) 1	-6.86161e-005 N	Achieved (IT = 100)	0.0006189 N	Checking criteria
SG Friction Force (Z) 1	0.000730713 N	Achieved (IT = 41)	0.0167319 N	Checking criteria
SG Normal Force (X) 1	-0.0323222 N	Achieved (IT = 40)	2.01404 N	Checking criteria
SG Normal Force (Z) 1	0.000213851 N	Achieved (IT = 40)	3.10405 N	Checking criteria

Figura 54. Caso 1 aro 2. Fuente: propia

- **Caso 2**

- Velocidad rueda 40 km/h = 11,1 m/s
- Velocidad viento = 10 km/h
- Angulo = 30 °
- Vel. fluido: z: 48,66 = 13,52 m/s x: 5 = 1,38 m/s Angulo = 30°
- Drag en z : 1,82 N
- Fricción superficie rueda en Z : 0,024

SG Friction Force (X) 1	0.000901796 N	Achieved (IT = 89)	0.000827836 N	Checking criteria
SG Friction Force (Z) 1	7.16209e-005 N	Achieved (IT = 46)	0.0240058 N	Checking criteria
SG Normal Force (X) 1	0.219112 N	Achieved (IT = 54)	4.29247 N	Checking criteria
SG Normal Force (Z) 1	0.000261056 N	Achieved (IT = 40)	1.8288 N	Checking criteria

Figura 55. Caso 2 aro 2. Fuente: propia

- **Caso 3**

- Velocidad rueda 40 km/h = 11,1 m/s
- Vel. Viento : z: 45,77 = 12,71 m/s x: 8,19 = 2,27 m/s Angulo = 55°
- Drag en z : 1,63N
- Fricción superficie rueda en Z : 0,0152

SG Friction Force (X) 1	0.000457364 N	Achieved (IT = 89)	0.000602222 N	Checking criteria
SG Friction Force (Z) 1	-0.000923546 N	Achieved (IT = 47)	0.0217641 N	Checking criteria
SG Normal Force (X) 1	-0.028266 N	Achieved (IT = 52)	4.59271 N	Checking criteria
SG Normal Force (Z) 1	0.000269587 N	Achieved (IT = 40)	1.65337 N	Checking criteria

Figura 56. Caso 3 aro 2. Fuente: propia

- **Caso 4**

- Velocidad rueda 40 km/h = 11,1 m/s
- Vel. Viento : z: 48,60 = 13,5 m/s x: 12,28 = 3,41 m/s Angulo = 56°
- Drag en z : 0,282 N
- Fricción superficie rueda en Z : 0,006

SG Friction Force (X) 1	0.000188802 N	Achieved (IT = 124)	0.00038354	Checking criteria
SG Friction Force (Z) 1	3.10456e-005 N	Achieved (IT = 47)	0.00599464	Checking criteria
SG Normal Force (X) 1	-0.0116027 N	Achieved (IT = 54)	1.01695 N	Checking criteria
SG Normal Force (Z) 1	0.000229777 N	Achieved (IT = 40)	0.286366 N	Checking criteria

Figura 57. Caso 4 aro 2. Fuente: propia

5.4.3. Análisis de resultados

En este apartado se comentan los resultados de las simulaciones y se realiza una valoración.

- **Aro 1**

Tabla 6. Resultados aro 1. Fuente: propia

Casos	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Promedio
Drag Z	2,82	1,63	1,48	0,26	1,54
Fricción Z	0,0152	0,022	0,019	0,005	0,015

- **Aro 2**

Tabla 7. Resultados aro 2. Fuente: propia

Casos	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Promedio
Drag Z	3,10	1,82	1,63	0,28	1,70
Fricción Z	0,016	0,024	0,015	0,006	0,015

Claramente, el aro 2 opone mayor fuerza al avance de la rueda, aunque su perfil parecía más aerodinámico según visto en los perfiles NACA (Vidal J.R.).

- **MAVIC**

Tabla 8. Resultados Mavic. Fuente: Team Bike

Casos	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Promedio
Drag Z	3,41	2,97	3,08	2,34	2,95

- **Zipp -303**

Tabla 9. Resultados ZIPP 303. Fuente: Team Bike

Casos	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Promedio
Drag Z	2,99	2,58	2,88	1,94	2,60

- **Zipp 404**

Tabla 10. Resultados ZIPP 404. Fuente: Team Bike

Casos	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Promedio
Drag Z	2,99	2,55	2,81	1,9	2,56

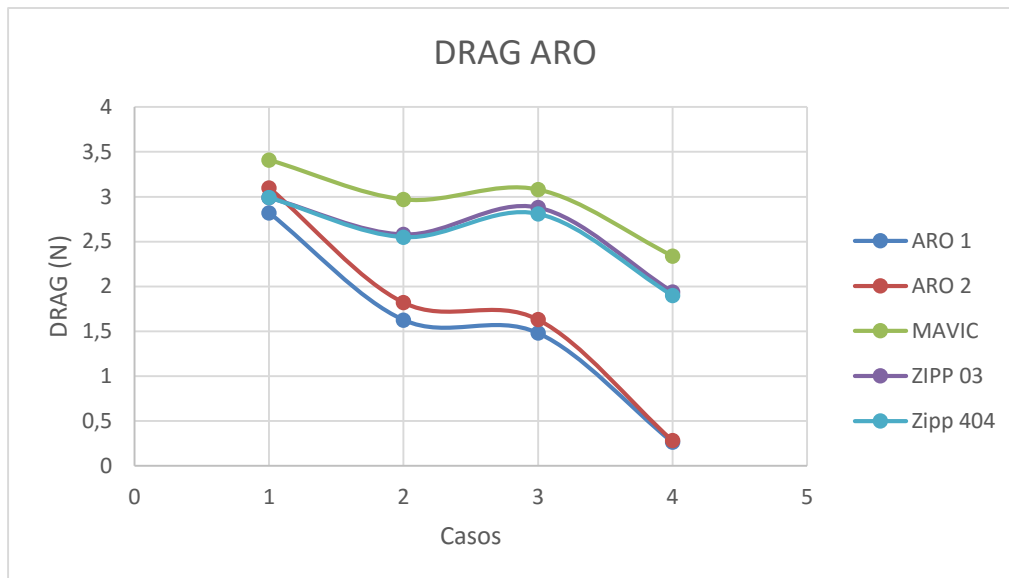


Figura 58. Gráfica de los resultados de las simulaciones. Fuente: propia

5.4.4. Conclusiones de las simulaciones

Este estudio sirve realmente como primer punto de contacto para el análisis aerodinámico de la pieza. Está claro que los estudios realizados por Mavic y por Zipp seguramente son más reales, y con mayor potencia de cálculo, que no las simulaciones realizadas en nuestros aros. En este estudio, sería interesante poder ver la fricción generada por los aros Zipp que tienen una característica particular sobre su superficie de contacto con el fluido, que según su fabricante genera menor fricción (ver figura 58).

Los aros realizados en este proyecto se pueden dar por válidos para hacer un prototipo y estudiarlo en condiciones reales en un túnel de viento, ya que los perfiles creados en nuestra simulación han sido elegidos mediante varias pruebas de simulación y análisis de gran cantidad de aros existentes en el mercado.

Si analizamos los resultados realizados en el estudio, podemos ver una cierta coherencia. La fuerza que nos interesa es el drag Z, que es la fuerza opuesta al avance; vemos que si aumentamos el ángulo de ataque del aire, el YAW (fuerza de sustentación) aumenta y el DRAG en Z disminuye. Para todos los modelos, el caso más crítico es cuando se tiene el "aire" completamente en dirección opuesta a nuestro avance.

Según nuestro estudio aerodinámico, para todos los casos nuestra rueda ganadora es el aro 1. Seguiremos con este modelo para realizar el análisis estructural, ya que no existen diferencias estructurales entre el aro 2 y el aro 1.

Hay dos puntos a tener en cuenta:

- Las ruedas con muy poco perfil ($<40\text{mm}$) generan un drag superior, debido a que su forma se asemeja más a la de un círculo que a la de una elipse.
- Muchos de los estudios aerodinámicos citados han evaluado con cautela, que no un mayor ancho del aro genera una drag menor por el hecho de que las líneas de corriente se adhieran mejor a la superficie. Para cada ancho de aro, existe una longitud de perfil óptima con el objetivo de reducir la eficiencia aerodinámica.

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA RUEDA DISEÑADA

Después del estudio aerodinámico, se ha realizado realiza un estudio estructural sobre las diferentes piezas que forman la rueda. Se han realizado estudios paramétricos sobre la cantidad y tipo de radiado, con el aro y el buje elegidos. Las empresas en todos sus análisis hacen referencia a test propios de los cuales sólo dan una cierta cantidad de datos, sobre todo los que a ellos les conviene, por lo tanto no es una fuente fiable de datos para consultar. Realizando una búsqueda se ha encontrado el test estructural de la empresa independiente "*Roues Artisanales*" sobre una gran cantidad de ruedas en 2008 (*Roues Artisanales* 2008).

Existe un test que la UCI ensaya sobre las ruedas que quieren formar parte del grupo de ruedas aptas, para poder competir dentro de carreras de la UCI. Los fabricantes no muestran estos resultados, ni la UCI tampoco, es más, muchos de estos fabricantes hacen estudios propios y sólo revelan algunos valores de sus estudios. Afortunadamente, hay una empresa que ha realizado un test estructural a una gran variedad modelos, llamada "*Roues Artisanales*". *Roues Artisanales* es una empresa "neutral" ya que no está vinculada a ninguna marca, y realiza una serie de test bastante similares a la UCI. *Roues Artisanales* describe detalladamente como realizan sus ensayos y muestra sus resultados "sin trampa ni cartón". La ventaja de escoger este tipo de test es que podemos realizarlo a través de la simulación a ordenador.

Después de obtener distintos resultados de la mejor opción aerodinámica de nuestros aros diseñados, ya se ha elegido nuestro aro. Primero, comprobaremos qué número de radios es mejor a nivel estructural, ya que

usaremos el mismo buje, y el mismo modelo de aro y radios. El aro será de fibra de carbono, el buje de aluminio 7075 y los radios de acero. Primeramente, se hará una simulación en acero para valorar el número de radios y conocer las solicitaciones de nuestra rueda.

Una vez elegido el número de radios, seguimos con la simulación del aro. El material elegido para su fabricación será de fibra de carbono. Se realizará una simulación aparte, porque en este caso, la simulación no se realiza como un sólido, sino como una superficie a la que se le aplican capas de fibra de carbono.

Se han detallado cuáles son las condiciones de contorno para los test que se van a realizar. Posteriormente, se ha mostrado estudio por estudio cual es el tipo de mallado utilizado, los resultados y las conclusiones.

El inconveniente de realizar estos ensayos por ordenador, es que es muy difícil la semejanza a la realidad, ya sea por a) la similitud de las posibles fuerzas que se puedan encontrar en la carretera, o por b) la configuración de los elementos de la rueda, por ejemplo el pretensado de radios o la presión de los neumáticos.

6.1. Condiciones de contorno

Como ya hemos visto en el capítulo de análisis de fuerzas, existen numerosas fuerzas que actúan sobre la rueda. Muchas de ellas son extremadamente complejas de modelizar en un ordenador, tanto es así, que muchos fabricantes no usan ningún tipo de simulación y simplemente copian a otras marca y realizan ensayos físicos de prueba y error. Está claro que estos fabricantes no optimizan su producto, que es lo queremos lograr con estos estudios.

Se han realizado unas simulaciones suficientemente válidas para la fiabilidad de nuestro producto, aunque también sería deseable un análisis de modos de vibración, aunque la mayoría de los fabricantes no las hacen, porque realmente no suele dar problemas en estos casos.

Finalmente se han llevado a cabo las simulaciones de rigidez frontal y rigidez lateral. En estos ensayos veremos qué fuerzas y con qué coeficientes de seguridad trabajaremos.

- Mallado

El estudio se ha realizado con distintos tipos de mallado. Se ha seguido una línea de prueba y error para comprobar hasta qué punto era necesario hacer un mallado más fino. La malla creada para estos dos estudios se dispone de (ver figura 59):

- Nodos: 73796
- Elementos: 42048

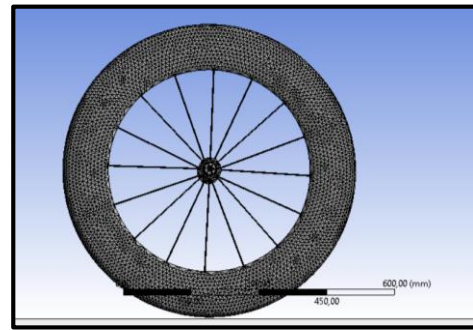


Figura 59. Mallado. Fuente: propia

- Sujeción

La sujeción para estas simulaciones se realiza desde el eje del buje como si la rueda estuviera anclada en una bicicleta (ver figura 60).

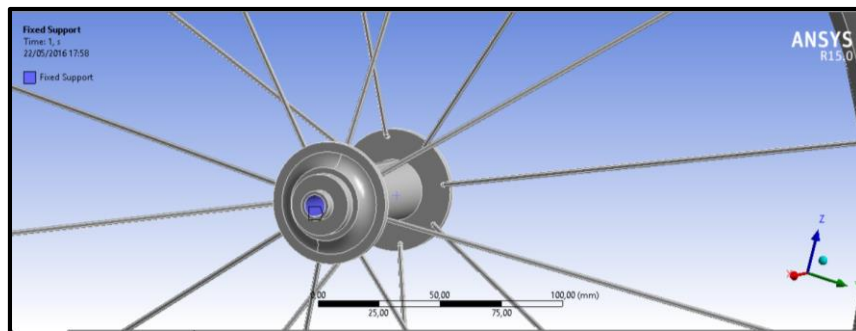


Figura 60. Sujeción. Fuente: propia

- Aplicación de la fuerza

La fuerza se ha aplicado en el borde del centro de la cubierta de manera vectorial (ver figura 61), como podremos apreciar en los apartados siguientes.

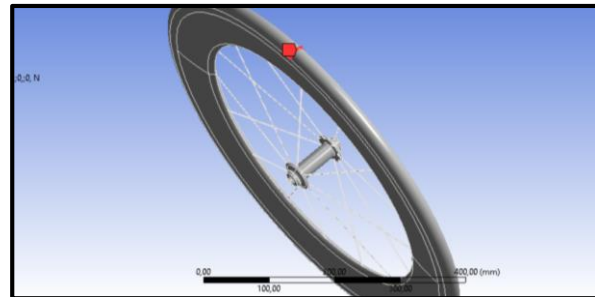


Figura 61. Fuerza frontal. Fuente: propia

Los resultados de estos test los compararemos con el modulo elástico del material y el criterio de *Von Mises*, y su deformación total (Borrego A. 2015):

- **Criterio de *Von Mises*:** se utiliza para analizar el número de radios fabricados con acero, un material isotrópico i dúctil. Este criterio calcula la tensión equivalente de *Von Mises* y la compara con el límite elástico del material, en este caso del acero ($O_e = 2,1 \cdot 10^{11} \text{Pa.}$). La tensión equivalente de *Von Mises* se calcula con la siguiente formula:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2}{2}}$$

- **Criterio de deformación:** siguiendo el diagrama de Tensión-Deformación proporcionado por Ansys, se ha determinado que no se quiere permitir una deformación mayor a 10 mm.

6.1.1. Test de rigidez frontal

El test de rigidez frontal realizado por *Roues Artisanales* consiste en fijar la rueda por el eje del buje como si estuviese montada en la bicicleta, y aplicar la fuerza en un punto del aro como si esa fuerza fuese la presión que ejerce la propia rueda contra el suelo.

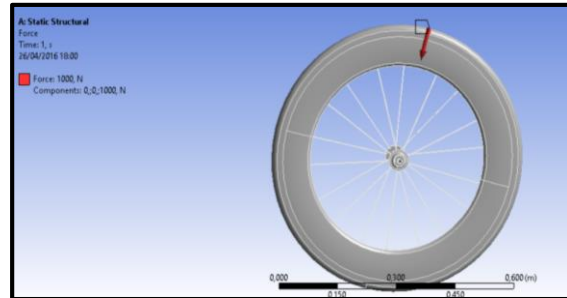


Figura 62. Fuerza frontal. Fuente: propia

La fuerza vertical que se la aplica a la rueda es de 1000 N, que vendría a ser un peso de 100 kg. Este es el caso más desfavorable, ya que un ciclista no irá sobre una rueda. También hay que tener en cuenta que el peso de ciclista se distribuye por el sillín, el manillar y los pedales, aparte de las ruedas (ver figura 62).

6.1.2. Test de rigidez lateral

Este test de rigidez lateral tiene el mismo punto de anclaje o sujeción que en el test anterior, pero en este caso la fuerza se aplica sobre un lateral del aro. Para simular el caso más desfavorable se ha aplicado la fuerza sobre la parte superior del lateral del aro.

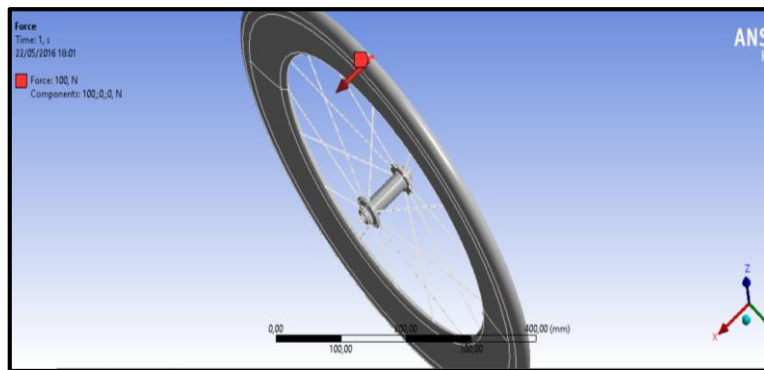


Figura 63. Fuerza lateral. Fuente: propia

La obtención de un caso real es muy complejo según *Roues Artisanales*. Según el ensayo que tomamos como referencia (Roues Artisanales 2008), se aplican diferentes pesas con un valor máximo de 240 N. Podemos tomar como referencia un experimento con una rueda montada en una bicicleta. Si aplicamos una fuerza con la mano de alrededor de 15 kg, equivalente a 150N, se puede alcanzar hasta 1 cm de flexión. Este desplazamiento que realiza la rueda hace que ésta friccione con las zapatas de freno, provocando que se frene la rueda (ver figura 63).

Se realizaran distintos ensayos a 100 - 150 - 200 - 250 N con el objetivo de encontrar el desplazamiento de la rueda en función de la fuerza aplicada, suponiendo que ésta se comportará de manera lineal en el caso de estos ensayos con acero.

6.1.3. Simulación del Test de rigidez frontal

Como ya se ha explicado en el apartado anterior de introducción de la prueba de rigidez frontal, se probaran distintos números de radios 16-18 para el aro diseñado.

Tabla 11. Casos de rigidez frontal

Casos	Fuerza (N)	Numero de radios
1	1000	16
2	1000	18

- Caso 1**

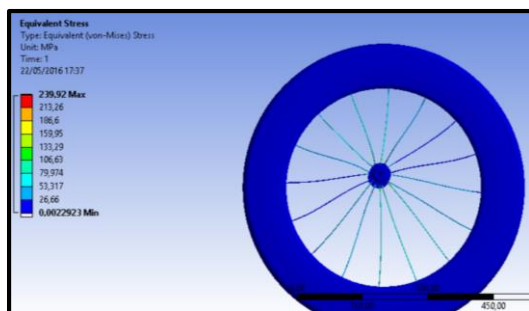


Figura 64. Caso 1 Von Mises fuera frontal. Fuente: propia

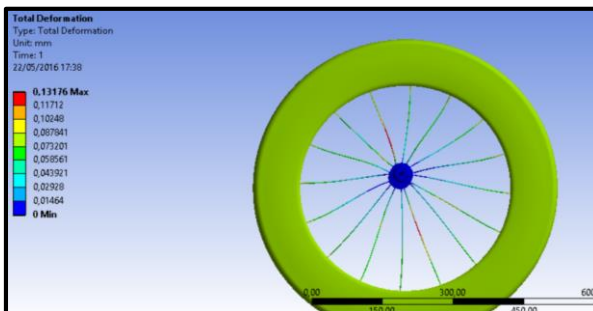


Figura 65. Caso 1 deformación fuerza frontal. Fuente: propia

- Caso 2**

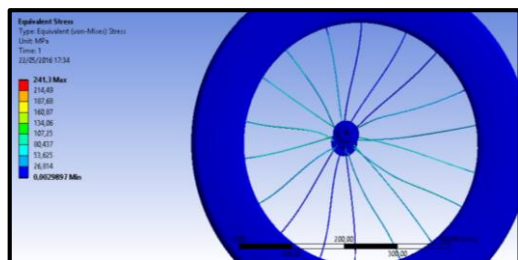


Figura 66. Caso 2 Von Mises fuerza frontal. Fuente: propia

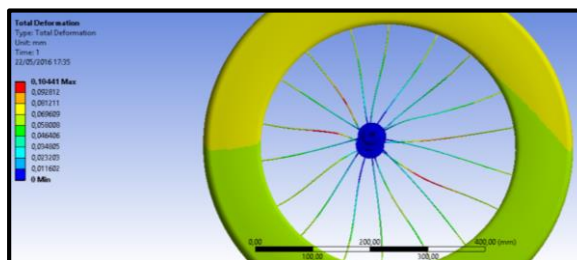


Figura 67. Caso 2 deformación fuerza frontal. Fuente: propia

• Resultados

Tabla 12. Resultados rigidez frontal. Fuente: propia

Casos	Fuerza frontal (N)	Numero de radios	Deformación (mm)	Tensión de Von Mises (MPa)
1	1000	16	0,13<10	$239 < 2,1 \cdot 10^3$
2	1000	18	0,104<10	$241 < 2,1 \cdot 10^3$

• Conclusión del test de rigidez frontal

Podemos llegar a la conclusión, como es lógico, que existirá una menor deformación en los radios de la rueda de 18 radios, que en la de 16. Pero lo que no acaba de cuadrar es la equivalencia de *Von Mises* para la rueda de 18 radios. Aun así, supera con creces este test, donde podemos aceptar la deformación de 0,13 mm en nuestros radios de acero. En este caso elegiríamos la rueda con 16 radios.

6.1.4. Simulación del Test de rigidez lateral

• Caso 1

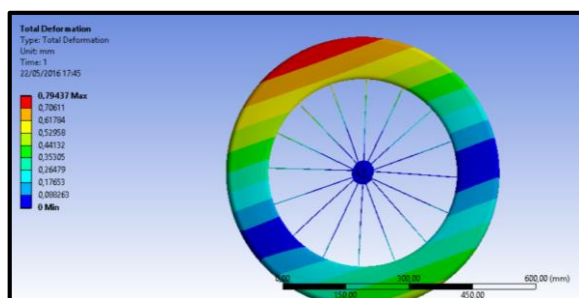


Figura 68. Caso 1 deformación fuerza lateral. Fuente: propia

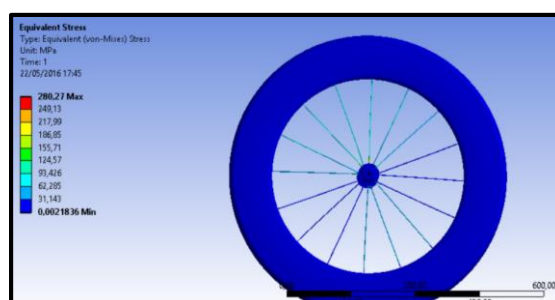


Figura 69. Caso 1 Von Mises fuerza lateral. Fuente: propia

• Caso 2

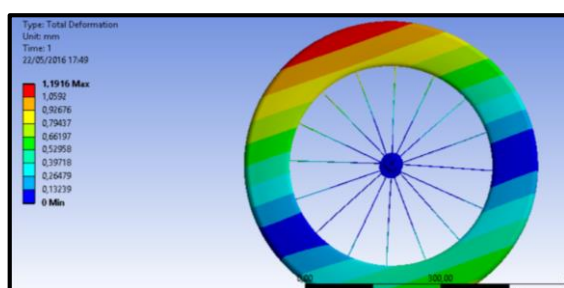


Figura 70. Caso 2 deformación fuerza lateral. Fuente: propia

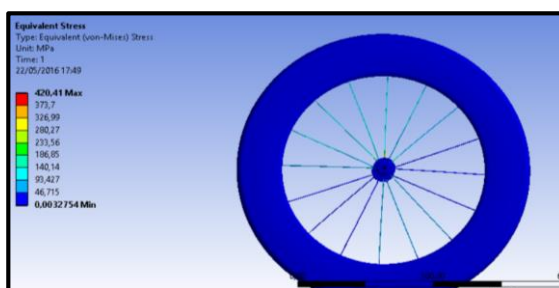


Figura 71. Caso 2 Von Mises fuerza lateral. Fuente: propia

• Caso 3

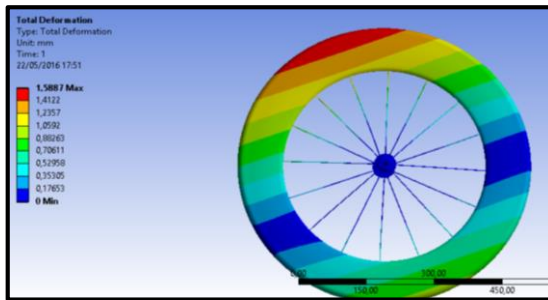


Figura 72. Caso 3 deformación fuerza lateral. Fuente: propia

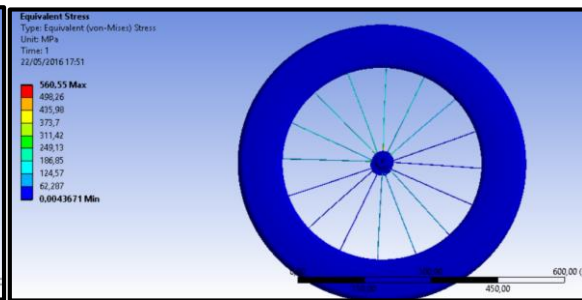


Figura 73. Caso 3 Von Mises fuerza lateral. Fuente: propia

• Caso 4

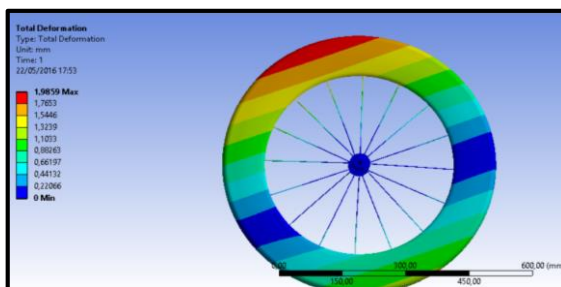


Figura 74. Caso 4 deformación fuerza lateral. Fuente: propia

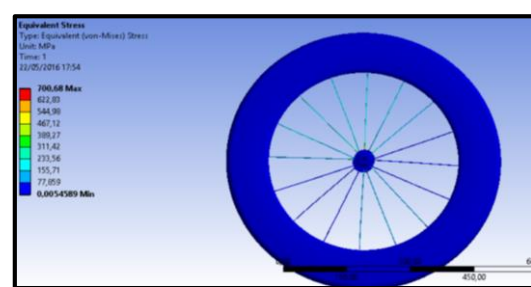


Figura 75. Caso 4 Von Mises fuerza lateral. Fuente: propia

• Caso 1'

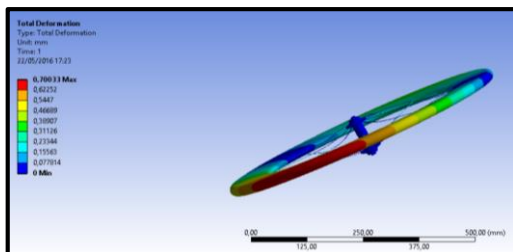


Figura 76. Caso 1' deformación fuerza lateral. Fuente: propia

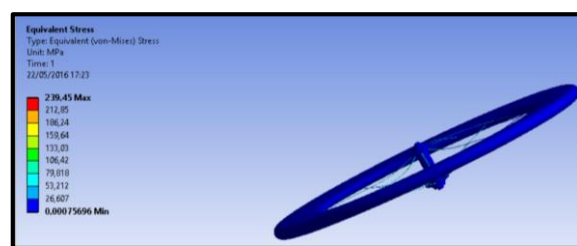


Figura 77. Caso 1' Von Mises fuerza lateral. Fuente: propia

• Caso 2'

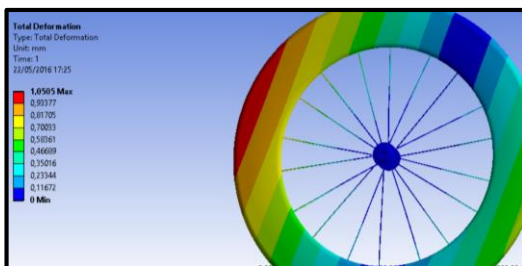


Figura 78. Caso 2' deformación fuerza lateral. Fuente: propia

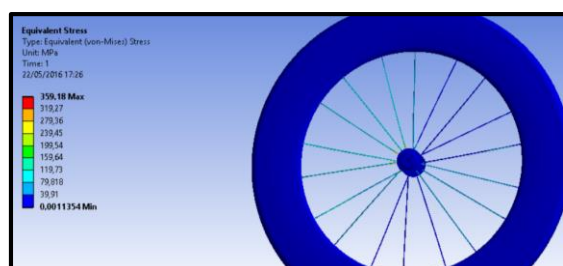


Figura 79. Caso 2' Von Mises fuerza lateral. Fuente: propia

- **Caso 3'**

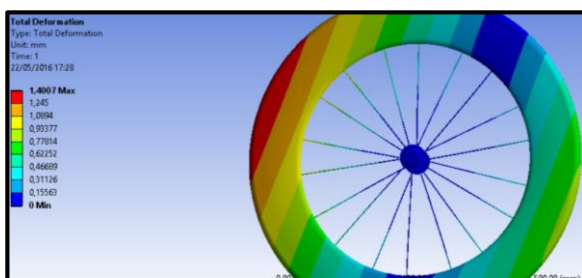


Figura 79. Caso 3' deformación fuerza lateral. Fuente: propia

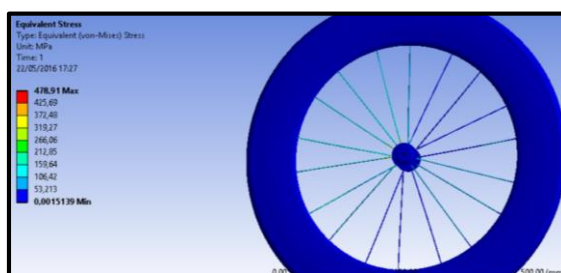


Figura 81. Caso 3' Von Mises fuerza lateral. Fuente: propia

- **Caso 4'**

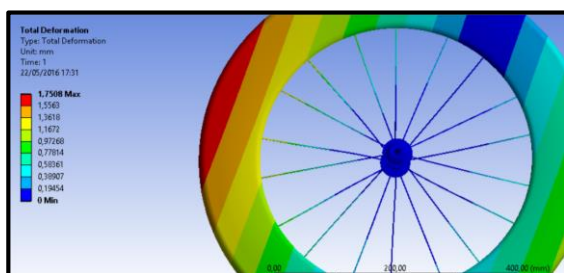


Figura 82. Caso 4' deformación fuerza lateral. Fuente: propia

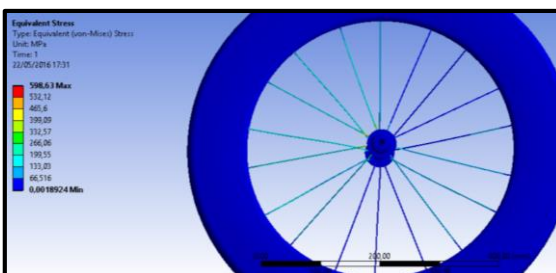


Figura 83. Caso 4' Von Mises fuerza lateral. Fuente: propia

- **Resultados**

Tabla 13. Resultados de rigidez lateral. Fuente: propia

Casos	Fuerza lateral (N)	Numero de radios	Deformación (mm)	Tensión de Von Mises (Mpa)
1	100	16	0,8<10	280<2,1·10 ³
2	150	16	1,20<10	420<2,1·10 ³
3	200	16	1,58<10	560<2,1·10 ³
4	250	16	1,98<10	700<2,1·10 ³
1'	100	18	0,7<10	239<2,1·10 ³
2'	150	18	1,05<10	358<2,1·10 ³
3'	200	18	1,4<10	478<2,1·10 ³
4'	250	18	1,75<10	598<2,1·10 ³

- **Conclusión del test de fuerza lateral**

Una vez más, nuestros modelos superan el test. En este caso podemos concluir que el modelo 18 será un poco más rígido para una fuerza lateral, pero tampoco tendremos problema con 16 radios si el aro que veremos en el

apartado siguiente es similar y aguanta de la misma manera que el aro de acero de este apartado. Podemos ver que existe como una tensión de equivalencia máxima de 700 MPa, tres veces menos al límite elástico del acero.

*nota: en este apartado solo queríamos ver la importancia del número de radios, ya que existen ruedas con un número menor de radios y los radios que utilizamos pasan unos controles de diseño similares a los utilizados en estas simulaciones.

6.2. Elección de radios

El tipo de radio ya está elegido desde el inicio, un radio DT ya configurado con las prestaciones que se buscan en una rueda de carretera. El tipo de radiado también está preconcebido desde el principio, ya que el estudio se ha realizado de la rueda delantera de carretera y se suelen utilizar solo dos tipos de radiado. Para las alas de nuestro buje hemos elegido un radiado recto interior que está explicado en el apartado 2.3.2 *Radio*. Como ya hemos citado anteriormente, el inconveniente de estas simulaciones es que no hay manera de realizar una configuración de la rueda en cuanto tensado de los radios, inflado del neumático, etc. Esto dificulta el uso de los resultados como datos reales para tener en cuenta en su construcción.

Para las ruedas delanteras de carretera de competición se suelen usar entre 16-20 radios, en este caso hemos elegido 16 o 18, porque nos interesa que la rueda sea lo más ligera posible, pero que a la vez sea muy rígida. Por estos motivos he elegido este modelo de radio, que es un radio muy aerodinámico.

6.3. Análisis de la estructura con fibra de carbono

6.3.1. Material utilizado por el fabricante PROGRESS

PROGRESS, como muchas otras empresas en este sector, fabrica en Taiwán, y no ha querido mencionar el nombre de la sub-empresa que fabrica para ellos las piezas de fibra de carbono. Se han elegido los valores de la fibra de carbono prepeg de la ESTEIB (Roure F. 2015). Los prepeg son fibra de carbono preimpregnada con una resina catalizadora, que activa el proceso de curación a una cierta temperatura. Se utiliza este tipo de fibras preimpregnadas, por la homogeneidad que dan a la pieza.

En este caso usaremos las técnicas de laminación de fibra pre-impregnadas, ya que se busca mayor calidad y no un volumen muy alto de producción.

- Fibra prepeg unidireccional

Es una fibra de carbono unidireccional preimpregnada, utilizada para espesores mayores de 0.3 mm, ya que tiene una compactación por lámina de 0.1 mm en el mejor de los casos. En cambio, por su alto gramaje de fibra, es una de las más resistentes que se encuentran en el mercado. En la referencia (Roure F. 2015) muestran todas sus propiedades (ver figura 84 y 85).

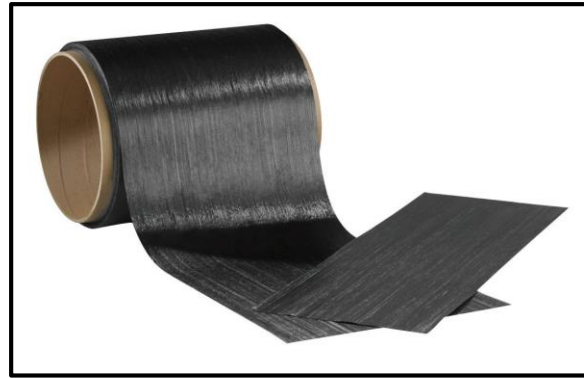


Figura 84. Rollo fibra de carbono unidireccional. Fuente: Resinas Castro

Properties of Outline Row 4: CarbonEpoxy				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	1600	kg m ⁻³	
3	Orthotropic Elasticity			
4	Young's Modulus X direction	1,81E+11	Pa	
5	Young's Modulus Y direction	1,03E+10	Pa	
6	Young's Modulus Z direction	1,03E+10	Pa	
7	Poisson's Ratio XY	0,014		
8	Poisson's Ratio YZ	0,014		
9	Poisson's Ratio XZ	0,28		
10	Shear Modulus XY	7,17E+09	Pa	
11	Shear Modulus YZ	1,434E+09	Pa	
12	Shear Modulus XZ	7,17E+09	Pa	

Figura 85. Propiedades fibra de carbono Ansys. Fuente: propia

6.3.2. Laminado de fibras prepeg: criterio de laminación

Nuestro aro recibe una gran cantidad de fuerzas, que pueden aparecer en casi todas las direcciones. Por ejemplo, para que la rueda no se deforme y adquiera la forma de un óvalo será necesario colocar las fibras del aro en dirección tangencial al mismo. En cambio, cuando la rueda sufra un impacto por culpa del terreno, la fuerza se transmite en dirección radial, por lo tanto será necesario otra lámina en dicha dirección. Por último, estas fuerzas pueden llegar al mismo tiempo de manera oblicua y ser una combinación de fuerzas tangenciales y radiales. Además, puede ser que una fuerza tangencial esté actuando en un lateral de la rueda y no en otro, y como consecuencia, cree un momento de torsión. Es por este motivo que la gran mayoría de los fabricantes utilizan fibras con una orientación oblicua; la habitual es de +45° y -45°, según el eje radial del aro. Podemos encontrar:

a) Tangencial: deformación (ver figura 86).

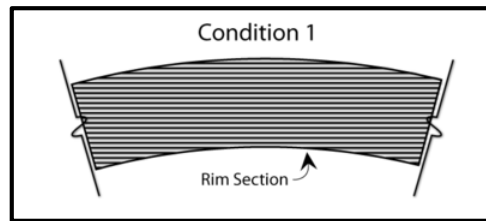


Figura 86. Orientación tangencial. Fuente: Reynolds

b) Radial: impacto (ver figura 87)

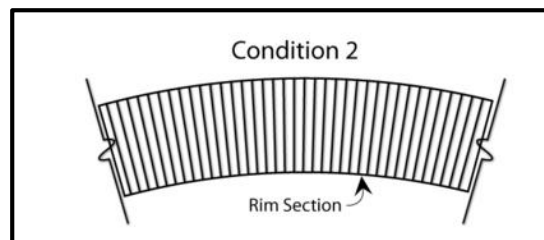


Figura 87. Orientación radial. Fuente: Reynolds

c) Oblicua: torsión (ver figura 88)

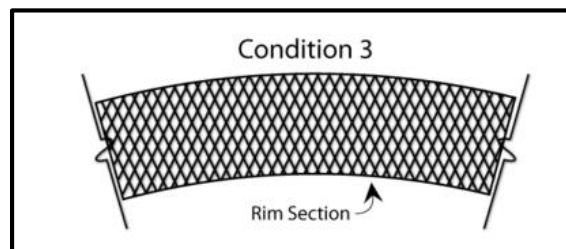


Figura 88. Orientación oblicua. Fuente: Reynolds.

En la referencia (Lew P. 2012), donde se habla de qué configuración es más importante según el tipo de disciplina, se expone que en la modalidad de carretera estas configuraciones deben tener un peso equitativo en la rueda. Para la laminación de nuestro aro seguiremos el tipo de configuración que opta la referencia para la disciplina de triatlón. El número de capas y la orientación la comentaremos en el siguiente apartado.

6.3.3. Criterio de simulación

Para este caso se ha usado *Ansys Static Estructural*, ya que es un software que permite trabajar con opciones de laminación, y permite ajustar las características de nuestra fibra recomendadas por el material. La simulación que hemos realizado, será el caso más crítico de la fuerza lateral y fuerza frontal. Se ha realizado un análisis simplemente de la parte del aro, ya que en el apartado anterior ya hemos comprobado si aguantan o no los radios de nuestras ruedas. En este apartado comentaremos los criterios y las condiciones que se han usado en la simulación:

- Mallado:

El estudio se ha realizado con distintos tipos de mallado. Se ha seguido una línea de prueba y error para comprobar hasta qué punto era necesario hacer un mallado más fino. La malla creada para estos dos estudios se dispone de (ver figura 89):

- Nodos: 7221
- Elementos: 7233



Figura 89. Mallado.
Fuente: propia

Podemos ver que el número de nodos y elementos es bastante inferior a las simulaciones anteriores, esto es sobre todo, porque en este caso no tenemos geometrías tan complejas como los radios, los codos de los radios y el buje, aparte de tener menos superficie que mallar.

- Fuerza:

La fuerza se ha aplicado como en las simulaciones anteriores.

- Sujeción de la pieza

Según el tipo de estudio hemos realizado una sujeción diferente que interfiera de la menor manera posible, ya que no disponemos del buje (ver figura 90 y 91).

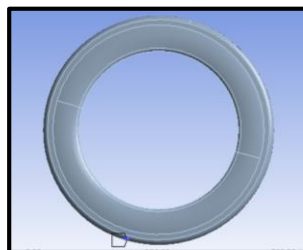


Figura 90.
Sujeción fuerza
frontal. Fuente:
propia

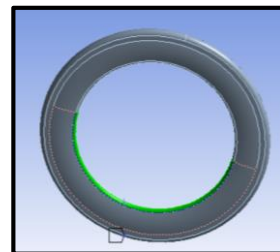


Figura 91.
Sujeción fuerza
lateral. Fuente:
propia

- El criterio usado para evaluar las capas de fibra de carbono es el criterio *quilático* o de *Tsai-Wu*. *Tsai-Wu* es más valido que *Von Mises*, ya que tiene en cuenta el efecto cuadrático que actúa sobre las tensiones en una dirección. Se basa en la siguiente desigualdad; sólo cumple si el resultado es menor o igual a 1, pero si es mayor entra en fallida:

$$F_{xx} \cdot \sigma_x^2 + F_{yy} \cdot \sigma_y^2 + F_{ss} \cdot \sigma_s^2 + 2 \cdot F_{xy} \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y + F_x \cdot \sigma_x + F_y \cdot \sigma_y \leq 1$$

Los valores según el laboratorio de la ETSEIB de F para la fibra de carbono se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Valores de F para la ecuación de Tsai-Wu valores sacados de laboratorio de materiales. Fuente: ETSEIB

	F_{xx} (GPa ⁻²)	F_{yy} (GPa ⁻²)	F_{ss} (GPa ⁻²)	F_{xy} (GPa ⁻²)	F_x (GPa ⁻²)	F_y (GPa ⁻²)
Carbono/ Epoxy (T300/52 08)	0,44	101,60	216,20	-3,36	0,00	20,93

- Se considera que las fibras son materiales ortotrópicos, es decir, que tienen diferente comportamiento según la dirección en las que estén orientadas las fibras. Tienen un comportamiento de una placa. Los valores en el eje z se han simplificado de la siguiente manera, según la referencia de los valores del laboratorio de materiales de la ETSEIB:

$$\begin{aligned}
 E_y &= E_z \\
 G_{xy} &= G_{xz} \\
 G_{yz} &= 0,2 \cdot G_{xy} = G_{xz} \\
 \mu_{xy} &= \mu_{yz} = 0,05 \cdot \mu_{xz}
 \end{aligned}$$

En la tabla 15 se muestran los valores que se utilizarán como propiedades del material:

Tabla 15. Propiedades fibra de carbono. Fuente: ETSEIB

		Fibra de carbono y resina epoxy (T300/5208)
E: módulos de Young	E_x (MPa)	181 000
	E_y (Mpa)	10 300
	E_z (Mpa)	10 300
G: módulos de Young transversales	G_{xy} (Mpa)	7 170
	G_{xz} (Mpa)	7 170
	G_{yz} (Mpa)	717
μ: coeficiente de Poison	μ_{xy}	0,014
	μ_{xz}	0,28
	μ_{yz}	0,014
P: densidad	ρ (Kg/m³)	1600
% de fibra	%	70
Tensión ruptura longitudinal de Tracción (X)	σ_r (MPa)	1500
Tensión ruptura longitudinal de compresión (X')	σ_r (MPa)	-1500
Tensión ruptura transversal de tracción (Y)	σ_r (MPa)	40
Tensión ruptura transversal de compresión (Y')	σ_r (MPa)	246
Tensión ruptura per cizallamiento (S)	σ_r (MPa)	69

6.3.4. Partes laminadas

En este caso lo que cambia respecto el apartado anterior es que en el programa no insertamos un sólido de nuestro programa CAD, sino que tenemos que insertar superficies que luego usaremos como capas donde pondremos nuestra fibra de carbono. Estas superficies las dividiremos en 4 partes, porque tienen diferente espesor según su localización. En este apartado comentaremos el número de capas y su orientación, según la zona que está subrayada en rojo.

- Flanco

Esta parte es una zona crítica, ya que se encuentra una concentración de tensiones por la situación de compresión del aro, y porque es el lugar donde se encuentran anclados los radios. Por lo tanto, esta parte tiene que ser muy resistente, y por eso se aplican 7 capas de fibra de carbono (ver figura 93 y 94).

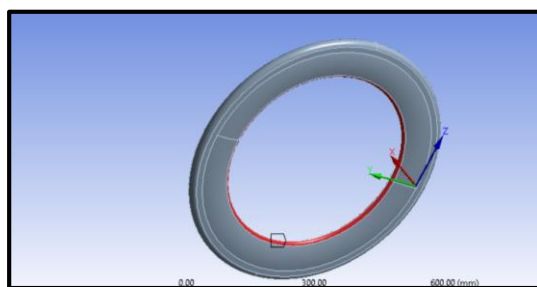


Figura 93. Flanco. Fuente: propia

En este caso se han probado diferentes configuraciones de capas de fibra de carbono según su orientación con ángulos de -15/15 o -30/30, pese a que (Lew P. 2012) recomendaba 0-90-45, y ciertamente el estudio nos da la razón de que las orientaciones que recomendaba optimizan la fibra en todos los aspectos.

flanco

Right click on the grid to add, modify and delete a row.
Layer 1 is on the bottom. Subsequent layers are added to the top, increasing in the +Z normal direction.

Layer	Material	Thickness (mm)	Angle (°)
(+Z)			
7	CarbonEpoxy	0,1	45
6	CarbonEpoxy	0,1	-45
5	CarbonEpoxy	0,1	45
4	CarbonEpoxy	0,1	-45
3	CarbonEpoxy	0,1	45
2	CarbonEpoxy	0,1	90
1	CarbonEpoxy	0,1	0
(-Z)			

Figura 94. Capas del Flanco. Fuente: propia

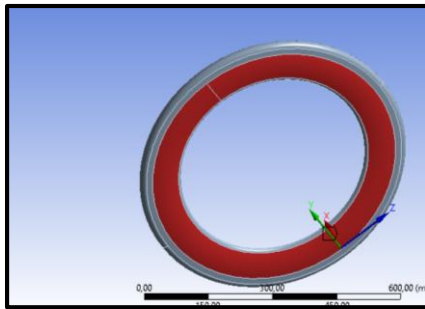


Figura 95. Lateral. Fuente: propia

-Lateral

Esta zona es donde realmente se concentran menores esfuerzos. No obstante, esta zona permite que la rueda sea más rígida que una con un lateral de menor superficie, ya que la longitud de la lateral resta distancia a los radios. Esta parte también es la que proporciona aerodinámica a la rueda. Si optimizamos bien las capas no será muy pesada y dará mucha rigidez (ver figura 95 y 96).

lateral			
Right click on the grid to add, modify and delete a row.			
Layer 1 is on the bottom. Subsequent layers are added to the top, increasing in the +Z normal direction.			
Layer	Material	Thickness (mm)	Angle (°)
(+Z)			
4	CarbonEpoxy	0,1	-45
3	CarbonEpoxy	0,1	45
2	CarbonEpoxy	0,1	0
1	CarbonEpoxy	0,1	90
(-Z)			

Figura 96. Capas lateral. Fuente: propia

- Pista frenado

La zona de pista de frenado en fibra de carbono es una zona crítica por dos razones:

1. Es una zona que llega a altas temperaturas por el efecto que realizan las pastillas de freno contra la llanta, pudiendo deformar las capas de fibra. Por ello, se le realiza un tratamiento especial sobre esta zona con basalto (ver figura 97 y 98).
2. Es una zona cercana al suelo, donde las fibras de esta zona reciben gran cantidad de esfuerzos, tanto laterales como perpendiculares.

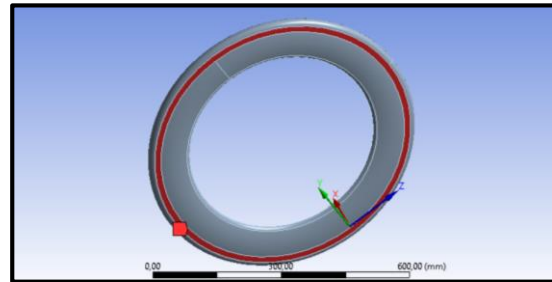


Figura 97. Pista de frenado. Fuente: propia

pistafrenado

Right click on the grid to add, modify and delete a row.

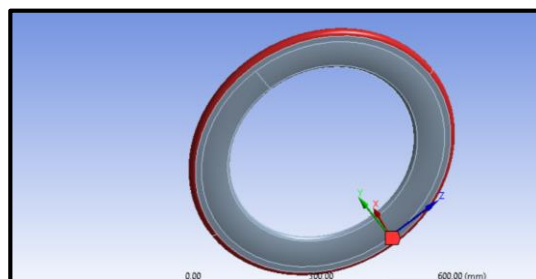
Layer 1 is on the bottom. Subsequent layers are added to the top, increasing in the +Z normal direction.

Layer	Material	Thickness (mm)	Angle (°)
(+Z)			
7	CarbonEpoxy	0,1	45
6	CarbonEpoxy	0,1	-45
5	CarbonEpoxy	0,1	45
4	CarbonEpoxy	0,1	-45
3	CarbonEpoxy	0,1	45
2	CarbonEpoxy	0,1	90
1	CarbonEpoxy	0,1	0
(-Z)			

Figura 98. Capas pista de frenado. Fuente: propia

- Garganta

Esta zona está sobredimensionada en la simulación, ya que no tenemos la acción del neumático que amortigüe los golpes y las fuerzas; es por esta cuestión que se ha sobredimensionado esta zona. La orientación de las fibras ha sido modificada, porque se ha observado que para este propósito la mejor opción de orientar todas las fibras es $-45/45^\circ$ (ver figura 99 y 100).

**Figura 99.** Garganta. Fuente: propia

garganta

Right click on the grid to add, modify and delete a row.

Layer 1 is on the bottom. Subsequent layers are added to the top, increasing in the +Z normal direction.

Layer	Material	Thickness (mm)	Angle (°)
(+Z)			
9	CarbonEpoxy	0,1	45
8	CarbonEpoxy	0,1	-45
7	CarbonEpoxy	0,1	45
6	CarbonEpoxy	0,1	-45
5	CarbonEpoxy	0,1	45
4	CarbonEpoxy	0,1	-45
3	CarbonEpoxy	0,1	45
2	CarbonEpoxy	0,1	-45
1	CarbonEpoxy	0,1	45
(-Z)			

Figura 100. Capas garganta. Fuente: propia

- Glosario de capas

Tabla 16. Glosario de capas. Fuente: propia

Partes	M ²	Ud. partes	Laminas	M ² totales	Espesor lam.	Espesor total	Coste Unidad	Peso Kg	Coste parte
Garganta	0,05	1,00	9,00	0,49	0,10	0,90	89,00	0,14	43,25
Pista frenado	0,03	2,00	7,00	0,40	0,10	0,70	89,00	0,06	35,64
Lateral	0,11	2,00	4,00	0,87	0,10	0,40	89,00	0,11	77,04
Flanco	0,02	2,00	7,00	0,22	0,10	0,70	89,00	0,04	19,44
Total				1,97			89,00	0,35	175,37

6.3.5. Simulación de rigidez frontal

- Tsai-Wu XZ

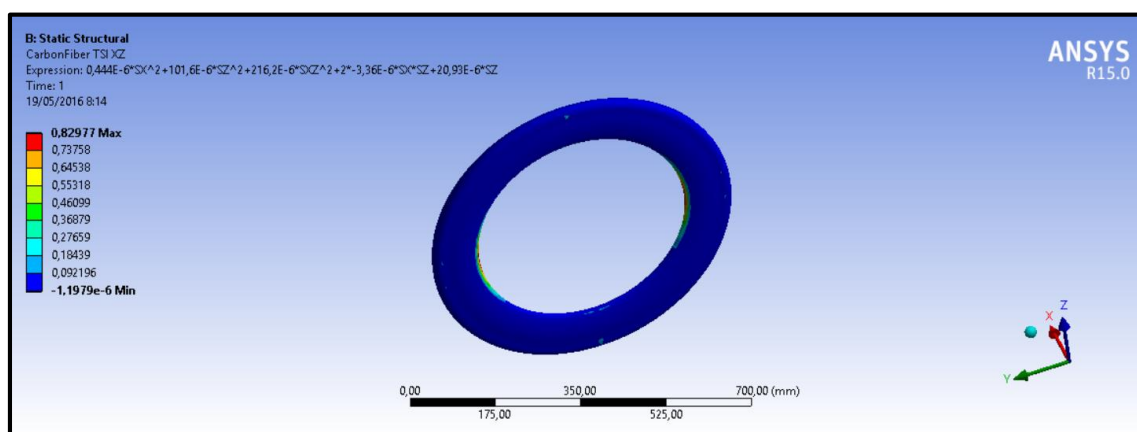


Figura 101. Tsai-Wu XZ rigidez frontal. Fuente: propia

- Tsai-Wu YZ

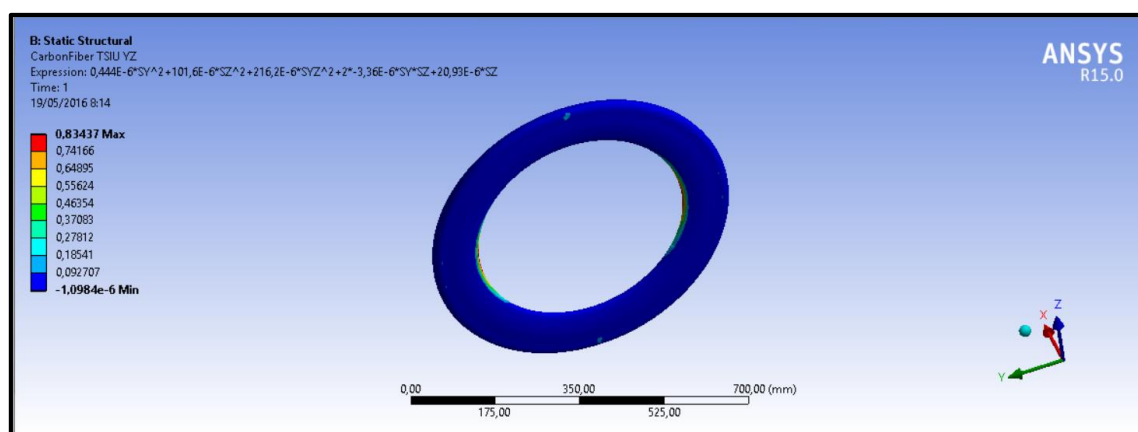


Figura 102. Tsai-Wu YZ rigidez frontal. Fuente: propia

- Deformación

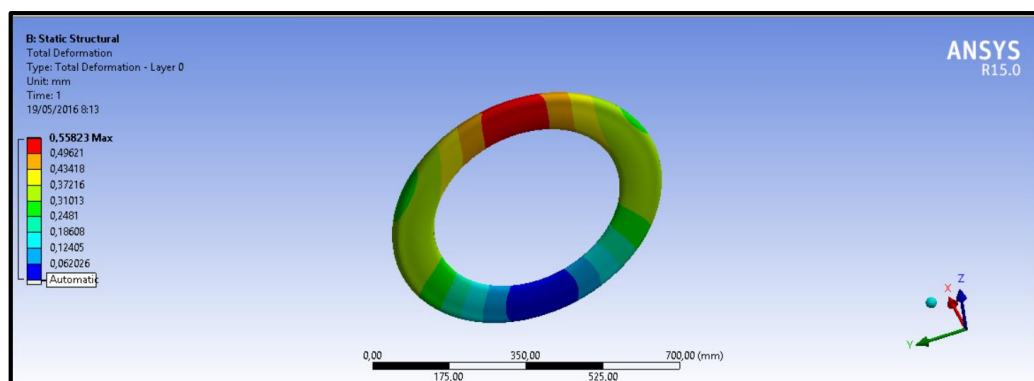


Figura 103. Deformación rigidez frontal. Fuente: propia

Tabla 16. Resultados rigidez frontal. Fuente: propia

Rigidez lateral	σ_y (MPa)	σ_z (MPa)	σ_s (MPa)	Tsai-Wu	σ_{eq} (MPa)
(Carbono/Epoxy)	$ -33,67 \leq 1500$	$ -64,06 \leq 246$	$ -18,95 \leq 69$	$0,829 \leq 1$	-
Fuerza y desplazamiento máximo	1000 N y 0,55 mm				

La rueda cumple los requisitos necesarios de esta simulación. Ninguna de las capas entra en la condición de rotura, ya que todas cumplen el criterio de Tsai-Wu inferior a uno, y vemos que la deformación del aro es menor a 0,6 mm.

6.3.6. Simulación de rigidez lateral (caso más crítico 250N)

- Tsai-Wu XZ

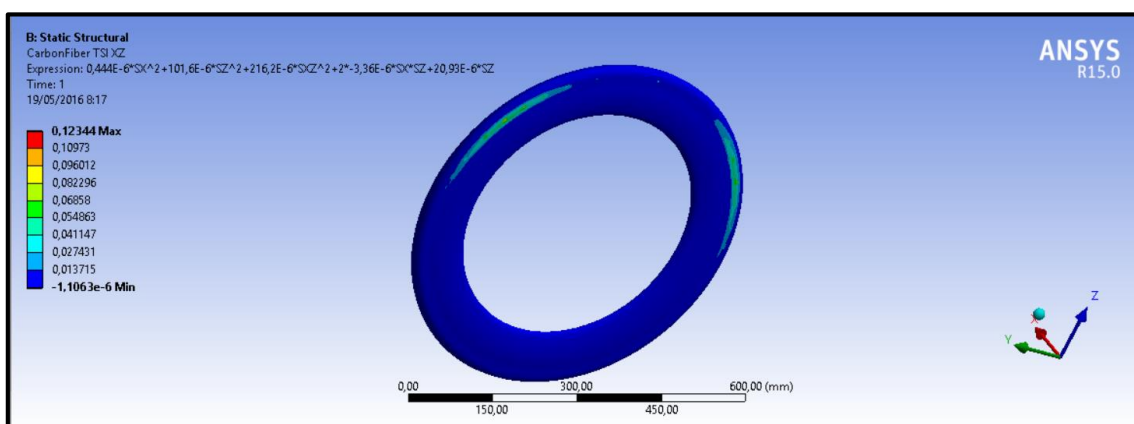
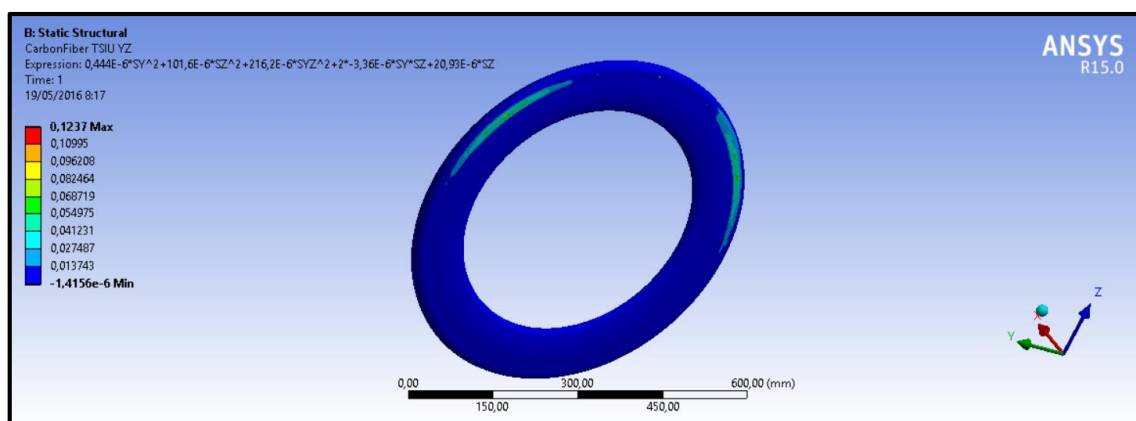
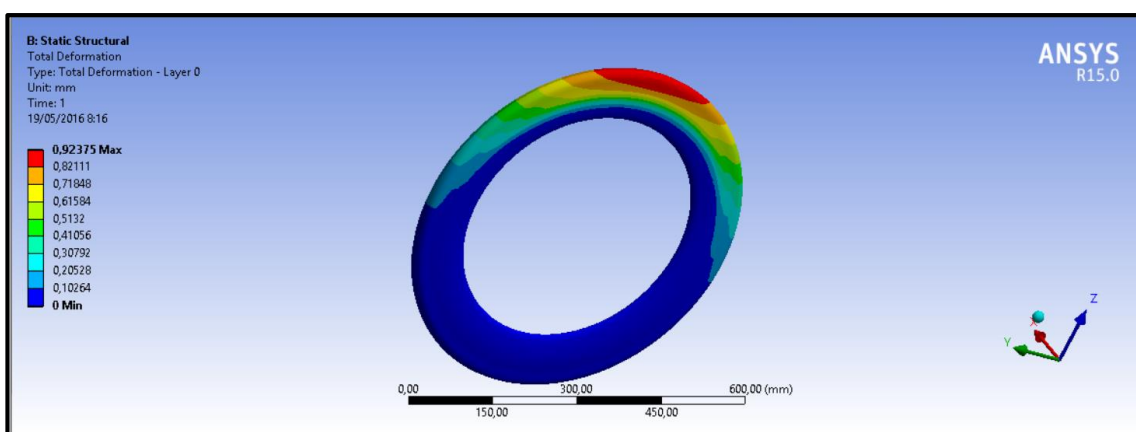


Figura 104. Tsai-Wu XZ rigidez lateral. Fuente: propia

- Tsai-Wu YZ

**Figura 105.** Tsai-Wu YZ rigidez lateral. Fuente: propia

- Deformación

**Figura 106.** Deformación rigidez lateral. Fuente: propia**Tabla 17.** Resultados rigidez lateral. Fuente: propia

Rigidez lateral	σ_y (MPa)	σ_z (MPa)	σ_s (MPa)	Tsai-Wu	σ_{eq} (MPa)
(Carbono/Epoxy)	$ -37,56 \leq 246$	$ -44,40 \leq 246$	$ -22,20 \leq 69$	$0,12 \leq 1$	-
Fuerza y desplazamiento máximo	250 N y 0,92 mm				

La rueda cumple los requisitos necesarios de esta simulación. Ninguna de las capas entra en la condición de rotura, ya que todas cumplen el criterio de Tsai-Wu inferior a 1, y vemos que la deformación del aro es menor a 0,12 mm.

6.3.7. Conclusión de las simulaciones

En este apartado 6.3 sólo hemos tratado con la geometría del aro y con el material de fibra de carbono. El procedimiento hubiera sido más óptimo, si se hubiera estudiado de manera conjunta el accionamiento de los radios de acero con la unión al aro de fibra de carbono. Ha sido realmente difícil hacer la simulación con fibra de carbono; la elección del material y el tipo de laminado, tanto su orientación como el número de capas. Se ha ido siguiendo el criterio de la marca americana *Reynolds* (Lew P. 2012), pero para acabar de ajustar el mínimo número de capas y la mejor configuración se han tenido que hacer muchas simulaciones a base de prueba y error.

Finalmente se ha visto que todo el cuerpo del aro es realmente rígido, ya que este ensayo ha sido muy exhaustivo, y se han implementaban las mismas fuerzas de ensayo en un aro que en toda una rueda. De esta manera sabemos que si por alguna razón los radios llegan a tener muy poca tensión o se rompe alguno, la rueda será realmente dura y no sufriría grandes desviaciones.

Los puntos débiles o puntos complicados de la simulación de nuestra pieza son:

1. Ansys no nos deja simular con un neumático a presión, o yo no he conseguido encontrar la manera de proyectar esta simulación.
2. Incluir radios sería interesante si se pudieran incluir las tensiones de los radios. En este caso no he encontrado la manera de realizar este ajuste en la rueda.

Por estos motivos finalmente realicé un estudio sólo con el aro, ya que es la parte que recibe primero las fuerzas y torsiones, y es la parte que quiero diseñar.

CAPÍTULO 7:

GEOMETRIA DISEÑADA

7.1. Aro

Finalmente elegiremos el modelo aro 1 con 16 radios.

7.2. Buje

El buje elegido será el buje PROGRESS TURBINE ULTRA proporcionado por la casa alemana Progress. Como se ha citado anteriormente.

7.3. Radios

Los radios DT SWISS DT AEROLITE.

CAPÍTULO 8:

FABRICACIÓN

En este apartado se explicará el proceso de fabricación de la pieza de este proyecto. Aunque parezca una pieza muy simple de construir el proceso es largo y costoso. Se explicará la materia prima de la cual estará hecho y cómo se orientarán estas, seguidamente se describirán las restricciones del proceso de fabricación: material necesario, herramientas y máquinas. Finalmente veremos el proceso de fabricación.

8.1. Restricciones de fabricación máquinas y materiales.

8.1.1. Máquinas

A continuación se explicarán que máquinas son necesarias en el taller.

- **Congelador industrial**

La fibra de carbono preimpregnada se almacena en un congelador industrial, para que no se inicie el proceso de catalización.

El precio del congelador utilizado por la marca Progress es de 2000 €.

- **Horno**

Para el proceso de curación es necesario someter la pieza a una temperatura dada durante un tiempo especificado por el fabricante de fibra de carbono. Para eso hace falta un horno en el cual se pueda regular la temperatura del mismo.

El horno que disponemos se diseñó con el objetivo de fabricar piezas de material compuesto, la temperatura se puede regular manualmente, y tiene un techo de servicio superior a los 200°. Las recomendaciones del fabricante, son que durante la fase de calentamiento la temperatura no suba más de 1-2°C/min. En principio, el horno del que se dispone no genera ninguna restricción sobre la fabricación de la rueda.

Este tipo de horno según Progress tiene un valor de 18.000 €.

- **Mesa de corte**

Esta máquina nos ayudará a recortar nuestras láminas de fibra de carbono de la manera más óptima posible, y realizar cortes limpios (Zcam 2016).



Serie G Modelo M-16 precio 64.000 € (ver figura 105).

Figura 105. Mesa de corta. Fuente: ZCAM

- **Compresor**

Se necesita un compresor con una presión máxima de 14 bares (Amazon 2016).

- **Taladradora**

Es necesario disponer de una taladradora de dos taladros alineados que podremos ver en el apartado de fabricación. Según la empresa PROGRESS el taladrado está valorado en 6.000 €.

8.1.2. Materiales

- **Papel de lija**

Es necesario para la limpieza de impurezas y resina de las piezas, y para realizar un acabado del molde, especificado para cada apartado.

- **Basalto**

Se usa esta piedra volcánica para recubrir la zona donde se coloquen las zapatas de freno, ya que ayudará a disminuir la temperatura en la acción de desaceleración. De esta manera, evitaremos problemas en nuestra rueda.

- **Cera**

Se utiliza cera para el desmoldeo de la marca *Paste Wiz* (Desmoldeante solido) (Resinas Castro 2016).

- **Elementos para realizar presión**

- Bolsa de presión: Se coloca dentro del perfil del aro de manera que cuando está en el horno, la bolsa se hincha y ejerce una presión de alrededor de 10 bares, de manera que compacta la pieza contra el molde.
- Válvula de presión: La válvula permite entrar en el molde e hinchar la bolsa a presión de la pieza.

- **Molde**

El molde es una parte más de nuestro diseño del proyecto. El problema que tiene esta pieza es que es muy cara y para amortizarla es necesario fabricar un volumen bastante grande de ruedas. La amortización del molde la veremos en el apartado de presupuesto.

8.1.3. Molde

Se realiza un molde de toda la rueda de manera que esté fabricada en forma monocasco. El molde esta comprendido de 3 partes (ver anexo: planos moldes):

- Molde macho o inferior: Este molde se situará en la parte inferior del horno, y encima de este se pondrá la rueda.
- Molde intermedio: Este molde estará dividido en 4 partes de las cuales una ellas tendrá una perforación para que se coloque la válvula de presión. Su cometido principal es aguantar la presión que se ejerce por la zona de la garganta del aro.
- Molde hembra o superior: Este molde es el opuesto del molde macho y se acopla perfectamente a éste y al molde intermedio.

- **Condiciones del molde:**

- Resistir temperaturas inferiores a 200°C.
- Resistencia a compresión de 10 bares de presión.
- Vida útil de 100.000 a 300.000 piezas

- **Material**

Elegimos un acero para moldes de la marca *Böhler*, el modelo M200 (Böhler 2016). Esta misma empresa nos realizará un estampado de la superficie más compleja de nuestras partes del molde, y entregará el subproducto estampado.

• Fabricación del molde

Seguidamente nos entregarán nuestro subproducto estampado y tendremos que mecanizarlo en un taller para realizar los taladrados, avellanados y acabados deseados, especificados en la hoja de ruta de cada parte del molde.

Las operaciones del planeado, taladrado y avellanado se realizarán con una fresa de CNC, y enviaremos el molde a mecanizar con las órdenes seguidas en la hoja de ruta.

Las herramientas necesarias se describen en la hoja de ruta con su referencia, aquí las citaremos:

- Fresa planeado: *Corokey* ref. RA245-200J47-18M (*Corokey* 2010)
- Herramienta 1: fresa de avellanador cónico de 90º y diámetro exterior= 20mm (*Rs online* 2016)
- Herramienta 2: Taladrado: Broca de 10 mm, referencia del producto: 1618 100 (*Wurth* 2016)
- Bruñido de bola (o el que mejor considere el fresador) para un acabado N4 para la superficie en contacto con el perfil (*López N.* 2005)
- Pulido manual con un grosor de grano de 320 o mayor para una calidad N3. (*Leroymerlin* 2016).

*Nota: En el anejo Hojas de rutas encontraremos los procesos.

8.2. Fabricación de la pieza de material compuesto

(Anónimo 2012)

En este apartado se darán unas nociones básicas de cómo fabricar cualquier pieza de material compuesto, con el objetivo de poder comprender con mayor facilidad el proceso de fabricación del aro. Es obligatoria para el control del proceso y la calidad de la pieza incluir un número de serie a cada aro, marcar los datos y los pasos de nuestra pieza en cada momento para comprobar que se han seguido bien los pasos. Para poder trabajar en el taller es siempre obligatorio utilizar el material adecuado, por lo que los usuarios que manipulen la fibra de carbono deberán estar provistos con un mono de trabajo, unas gafas y guantes debido a que la resina epoxi que posee la fibra es tóxica. Por ejemplo, si se queda algún resto de fibra sobre un corte que tenga el usuario, éste tiene muchas posibilidades de infectarse. El proceso de fabricación se compone de los siguientes apartados:

8.2.1. Preparación del molde

Una vez obtenido el molde se pueden utilizar diferentes materiales para poder facilitar el desmoldeo posterior de la pieza. *Manual de uso de la cera Paste Wiz* (Resinas Castro 2016) pagina 1.

Modo de uso: Aplicar sobre un molde limpio. Aplicar una capa fina, nunca en exceso. Dejar secar unos 15-20 minutos a temperatura de 23°C y pulir manualmente con trapos o sabanas de algodón. Aplicar 3 capas hasta que la superficie este sellada y lustrosa. Molde piezas hasta que una de las piezas muestre una ligera resistencia al desmoldeo. Reaplique 2-3 capas y continúe moldeando.

**Nota: mantenga la cera en envase cerrado mientras no la utilice.*

8.2.2. Corte de la fibra de carbono

Una vez conocida la geometría de la pieza y la laminación, se saca del congelador la fibra de carbono, que está en un tubo, para que su temperatura aumente y sea más maleable para poder cortarla con más facilidad. Este proceso no dura más de 5 minutos, y además tampoco es aconsejable que la fibra de carbono que no se vaya a utilizar esté un largo tiempo fuera del congelador. Una vez la fibra está lista para cortarse, al llevar un film protector entre láminas, se pone en la mesa de corte donde una máquina de control numérico cortará las láminas deseadas aprovechando el máximo material posible.

8.2.3. Fabricación del aro

Lo primero es definir el método mediante el cual se realizará el curado. En este caso no se realizará vacío durante el curado (como se hacen para otras piezas) sino que se introducirá una bolsa dentro del aro con aire a presión. En el taller se dispone de un compresor con una presión máxima de 14 bares. Se realizará este método debido a que evidentemente es mucho más efectivo realizar una presión de 10 bares sobre una superficie, que el método de bolsa de vacío. Este método es el más utilizado en la fabricación de aros de ruedas de bicicleta de carbono, como se puede ver en las referencias (Tokyo Wheel 2014; Pro-lite 2014; AudiBike 2015 y Bontrager 2013).

8.2.4. Laminado sobre el núcleo



Figura 106. Bolsa de presión. Fuente: EASTON WHEEL



Figura 107. Núcleo de la rueda. Fuente: TOKYO WHEELS

Siguiendo el orden de las fibras desde el interior del aro hasta el exterior, vamos colocando los distintos tipos de fibra en las direcciones deseadas sobre el núcleo nuestro aro, sin acabar de cerrar para poder extraer la fibra del núcleo y poder poner la bolsa de aire* en el interior del aro (ver figura 106 y 107). Finalmente aplicamos las ultimas capas de fibra de carbono en la garganta de la rueda, de esta manera cerramos el contorno y añadimos una capa de basalto en la superficie de frenado.

8.2.5. Colocación interior del molde

Siguiendo el orden comentado en el apartado de simulación de fibra de carbono, ponemos nuestra pieza en el molde principal. Añadiremos la válvula de presión a nuestra pieza y seguidamente iremos acoplando las partes del molde (ver figura 108).



Figura 108. Molde de la rueda. Fuente: TOKYO WHEELS

8.2.6. Curado

Con todo listo se cierra el molde y se introduce en el horno. El curado se realizará con una temperatura inicial de 120°C subiendo la temperatura a un ritmo de 1°C/min hasta que llega a 165°C, según la recomendación de la empresa para sus "prepeg". El aire se fija a una presión de 10 bares durante todo el proceso de curado. Aproximadamente cuando llevaba 1 hora ha



Figura 109. Curación. Fuente: TOKYO WHEELS

alcanzado su máxima temperatura, a partir de ahí enfriamos gradualmente el horno a 1°C/min hasta temperatura ambiente. Es muy importante que exista una curva muy similar entre calentamiento y enfriamiento para sacar las mejores propiedades del material y que sea una pieza muy homogénea (ver figura 109).

8.2.7. Desmoldeo

Hay una pequeña cantidad de resina excedente, debido a la presión que hay dentro del perfil. Tras quitar los elementos de fijación, el molde no se separa, hay que dar golpes de mazo en los moldes. Toda la resina sobrante hay que ligarla.

8.2.8. Taladrado

Se hace un taladrado de 10 mm en la parte superior del aro, en la garganta, para poder acceder a las cabecillas. También se realiza un taladrado de la parte inferior del perfil, para poder insertar el radio dentro de las cabecillas (ver figura 110).

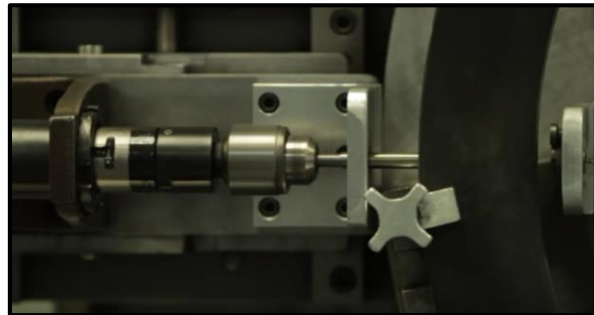


Figura 110. Taladrado. Fuente: Easton Wheel

Se usara brocas especiales para composites (Corokey 2016).



Figura 111. Limpieza aro. Fuente: Easton Wheel

8.2.9. Limpieza de aro

Limpieza de la superficie del aro para dejar una superficie de calidad de superacabado con un pliegue de lija al agua P360 (Leroymerlin 2016): para sacar pequeñas imperfecciones y residuos generados por los taladrados, o pequeñas rebabas de las resinas. Se deja una superficie en condiciones para pasar al siguiente paso de pintura y lacado (ver figura 111).

8.2.10. Pintura y lacado

En este punto se realiza una serigrafía o un vinilo de la marca y modelo de la rueda que el fabricante desee. Finalmente, se incluye una capa superficial protectora para proteger el carbono y el vinilo (ver figura 112).



Figura 112. Lacado. Fuente: Easton Wheel

8.2.11. Montaje de radios y buje

Se realiza el montaje de radios y una comprobación de que el buje gira correctamente. Una vez montados, se añade aceite en las cabecillas, y se realiza una comprobación de la tensión de cada radio y de la lineación de la rueda (ver figura 113).



Figura 113. Tensado de radios. Fuente: Easton Wheel

8.2.12. Control de calidad

Una vez terminado todo el proceso de fabricación, antes de realizar nuestro embalaje para enviar las ruedas a nuestro cliente, tenemos que garantizar que nuestras ruedas han salido correctamente de la fábrica y para ello tenemos que ver si han cumplido estas condiciones:



Figura 114. Control de calidad.
Fuente: Bontrager

1. Hay que pesar las láminas de la rueda y la rueda al finalizar, de manera que no puede variar de ± 50 gr de nuestro peso marcado.

2. De cada modelo de rueda nuevo hay que realizar un test físico, para comprobar que antes de salir al mercado cumple las condiciones que obliga la UCI (Sirris 2009).

3. Limpiar el horno y moldes, comprobación de las temperatura del horno, comprobar en la hoja de esta rueda que se ha llevado a cabo el check-list.

4. Comprobación de las desviaciones máximas de equilibrado de la rueda $\pm 1,5$ mm y tolerancias (ver figura 114).

CAPÍTULO 9:

CONCLUSIONES

Una vez finalizado el trabajo queda por decir si se han cumplido o no los objetivos, y que conclusiones se pueden obtener del proyecto. Teníamos los siguientes puntos a mejorar:

- Aerodinámica

Hemos trazado nuevos perfiles más aerodinámicos que otros modelos existentes en el mercado, mejorando el perfil de la A-88 (la marca PROGRESS no nos ha proporcionado los datos aerodinámicos de sus ruedas). Para corroborar los cálculos de la simulación tendríamos que realizar un prototipo y probarlo en un túnel de viento físico.

- Resistencia

Las simulaciones de resistencia han sido de gran ayuda para comprobar que nuestra rueda soporta los esfuerzos que puede realizar el ciclista mientras circula.

Este apartado ha sido un punto muy importante del trabajo, ya que el propósito del proyecto era realizar los aros de fibra de carbono y poderlos simular con algún software. He tenido muchas dificultades en el autoaprendizaje del software Ansys por cuatro razones:

- 1- La instalación del programa me ha dado muchos problemas y muchas veces me bloqueaba el uso del programa por el error de la lectura de la licencia.

- 2- Todos los menús y tutoriales del programa estaban en inglés, una lengua que domino con dificultades, además de tener muchas palabras técnicas.
- 3- La novedad de trabajar con superficies, en vez de trabajar con un sólido como estaba acostumbrado. Se trabaja en superficies para hacer posible la laminación de las fibras de carbono.
- 4- Finalmente, también he tenido que utilizar un criterio que no se ha dado durante todo el grado, ya que no habíamos tratado problemas con fibras de carbono.

Podemos concluir que con los resultados de nuestros ensayos nuestra rueda es suficientemente robusta para el uso de ciclismo de carretera.

- Peso

Como ya se ha tratado en el apartado de resistencia, se ha optimizado la resistencia de nuestra rueda vs. el peso. Para mejorar la resistencia con las mínimas capas de fibra de carbono se han seguido las recomendaciones de la marca Reynolds (Lew P. 2012), que nos ha llevado al número de capas finalmente utilizadas.

Tabla 18. Características aro. Fuente Bontrager

Partes	M ²	Ud. partes	Laminas	M ² totales	Espesor lam.	Espesor total	Coste Unidad	Peso Kg	Coste parte
Garganta	0,05	1,00	9,00	0,49	0,10	0,90	89,00	0,14	43,25
Pista frenado	0,03	2,00	7,00	0,40	0,10	0,70	89,00	0,06	35,64
Lateral	0,11	2,00	4,00	0,87	0,10	0,40	89,00	0,11	77,04
Flanco	0,02	2,00	7,00	0,22	0,10	0,70	89,00	0,04	19,44
Total				1,97			89,00	0,35	175,37

En este proyecto sólo se ha realizado el estudio para la rueda delantera porque es la rueda que dispone de menores radios. Los estudios realizados en el aro y los radios son los mismos que se realizan a una rueda trasera. Como no diseñamos los bujes ni los radios, la opción para realizar la rueda trasera es el mismo buje de la misma casa pero con 24 radios y montados de la manera deseada por el cliente. El peso del set de ruedas son los siguientes:

Tabla 19. *Peso rueda delantera**Fuente: propia*

Peso rueda delantera (Kg)	
Peso aro	0,35
Peso buje	0,07
Peso 16 radios	0,05
Peso rueda	0,47

Tabla 20. *Peso rueda trasera.**Fuente: propia*

Peso rueda trasera (Kg)	
Peso aro	0,35
Peso buje	0,20
Peso 24 radios	0,07
Peso rueda	0,63

Nuestra rueda ha pasado este punto con nota. Sabiendo que es muy difícil conseguir ruedas que solo pesen alrededor de 1 Kg, además teniendo un perfil de grandes dimensiones, es todo un hito.

- Coste

Desconociendo el beneficio que saca la empresa Progress de su rueda A-88, nosotros hemos realizado una aproximación de beneficios-coste, con resultados que parecen viables para el mercado en el que nos situamos. En el apartado de estudio económico podemos ver que el precio de venta al público de nuestro Prototipo-88 es inferior a las ruedas Bontrager, Zipp o Mavic; aun así podemos trabajar con un margen bastante elevado. El precio de venta al público de estas ruedas es un precio similar a las ruedas anteriores de Progress A-88, así que desconociendo el margen de beneficio que tienen las anteriores ruedas, podemos dar por satisfecho este punto del trabajo.

Finalmente podemos concluir, que se ha logrado hacer unas ruedas de mayor aerodinámica, menor peso, de una rigidez suficiente para que el aro aguante las fuerzas de compresión y flexión sin montar radios (con los radios aguantará mejor estas fuerzas), y por lo que hace referencia al coste: tenemos una rueda de mayor calidad por el mismo precio que una de calidad inferior.

CAPÍTULO 10:

REFERENCIAS

BIBLIOGRÁFICAS

Ali Rodriguez A. Y. 2014. "SolidWorks Flow Simulation 2014- Tutorial 2". Ultimo acceso 13/3/16. <https://www.youtube.com/watch?v=QA2M0z-iA30>

Amazon 2016. "Compresores. Michelin". Ultimo acceso 22/4/16. <https://www.amazon.es/Michelin-CA-MCX671-14-Compresor-BAR/dp/B00SRX1812>

Anónimo 2012. "Diseño y construcción de una llanta para un monoplaza de la Formula Student" TFG, ETSEIB, Universidad Politécnica de Cataluña.

Audibike 2015. "Lightweight Carbon Bicycle Rim In Progress For AUDIBIKE". Ultimo acceso 13/3/16. <https://www.youtube.com/watch?v=5CpToS6CXoY>

Böhler 2016. "Aceros para moldes serie M200" Ultimo acceso 3/6/16. [http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/M200DE\(1\).pdf](http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/M200DE(1).pdf)

Bike Sales 2013. "Bontrager wheel Works". Ultimo acceso 30/3/16. <https://www.youtube.com/watch?v=nMIL6ePXtGk>

Bikepass 2011. "Herramienta de tensión de radios". Ultimo acceso 13/3/16. <http://www.bikepass.es/wp-content/uploads/2011/10/pau-0521.jpg>

Bontrager 2013. "Keith Bontrager Part II: Mature Art" Ultimo acceso 20/2/16. https://www.youtube.com/watch?v=gMAFtUV_zns

Brandt, J. 2006. "The Bicycle Wheel" 3o Edición. Palo Alto (California). Avocet. (Brandt 2006, 64-65)

Borrego, A. 2015. "TFG Disseny, simulació i fabricació d'uns esquís de muntanya". TFG, ETSEIB, Universidad Politécnica de Cataluña.

Corkey 2010. "Catálogo de herramientas rotativas 2010".

Corokey 2016. "CORODRILL 452". Ultimo acceso 13/3/16.
http://www.sandvik.coromant.com/es-es/products/corodrill_452/

Dt Swiss 2016. "Componentes of RIM, SPOKES DT AEROLITE". Ultimo acceso 24/5/16
<https://www.dtswiss.com/Components/Spokes/DT-aerolite>

Dt Swiss 2016. "Maual de tensión de radios DT SWISS". Ultimo acceso 14/5/16.
<https://www.dtswiss.com/Resources/Support/PROLINE/DT-Swiss-Proline-Tensio-User-Manual-en>

Easton Wheel 2012."BIRTH OF A CARBON WHEEL". Ultimo acceso 30/5/16.
https://www.youtube.com/watch?v=ZxTWSTo2_4Q

Feiereisen B. 2011. "Bicycle Racing on the Computer? Modeling and Simulation for a Small Business ". Universidad de México. Ultimo acceso 30/5/16.
http://www.enterprisetech.com/2011/12/09/bicycle_racing_on_the_computer_modeling_and_simulation_for_a_small_business/

Hens Suna A. 2013. "Tipo de radiado". Ultimo acceso 24/4/16.
http://geocities.ws/antonioosunahens/1.4Tipos_de_Radiado.html

Jaivan 2011. "Fisica de la Bicicleta II". Ultimo acceso 29/2/16.
<https://jaivan.wordpress.com/2011/03/25/fisica-de-la-bicicleta-ii/>

Karman V. 2015. "Ansys Fluent CFD Tutorial- Flow over a Cylinder".
<https://www.youtube.com/watch?v=DXWO-X16UIo>

Langley, J. 2003 "Anatomía específica de la bicicleta". Ultimo acceso 24/2/16.
<http://es.slideshare.net/pepeinef/anatoma-especifica-de-la-bicicleta>

Leroymerlin 2016. "Pliege de lijas". Ultimo acceso 13/2/16.
http://www.leroymerlin.es/fp/550207_metales/550207-metales-metales?pathFamiliaFicha=550207&uniSelect=undefined&longitud=undefined&ancho=undefined

Leroymerlin 2016. "Pliegue de lijas" Ultimo acceso 13/2/16.
http://www.leroymerlin.es/fp/550207_agua/550207-agua-agua?pathFamiliaFicha=550207&uniSelect=undefined&longitud=undefined&ancho=undefined

Lew P. 2015. Director of Technology and Innovation, Reynolds Cycling, LLC 2012. "WORLDS APART: THE WIND TUNNEL AND THE REAL WORLD". Ultimo acceso 5/2/16.
<http://www.reynoldscycling.com/reynolds/news/Worlds-Apart-the-Wind-Tunnel-and-the-Real-World>

Lew Pau. Director of Technology and Innovation, Reynolds Cycling, LLC 2012 "UNDERSTANDING WHEEL DYNAMICS: THE INFLUENCE OF FIBER ANGLES ON PERFORMANCE CHARACTERISTICS". Ultimo acceso 1/5/16.
<http://www.reynoldscycling.com/reynolds/news/Understanding-Wheel-Dynamics-The-Influence-of-Fiber-Angles-on-Performance-Characteristics%BB>

López N. 2005. "Mejora de la Rugosidad de moldes y matrices mediante el bruñido con bola". VII Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. México.

M.L. Hull.1999. "Quantification of Stuctural Loading During Off-RoadCycling". Journal of Biomechanical Engineering. Universidad de California.

Márquez Linares J.2015. "Diseño, cálculo, pruebas de fabricación y fabricación de un subchasis en material compuesto para una motocicleta de competición en circuito de velocidad". TFG, Universidad de Sevilla.

Mavic 2015. "Sistemas neumático rueda CX0". Ultimo acceso 4/6/16. <http://www.mavic.com.es/sistemas-rueda-neumatico/cx01>

Mechanical Tutorials 2015. Fluent Ansys Analysis. "Ar Flow in car analysis using Fulent (CFD)". Ultimo acceso 13/3/16. <https://www.youtube.com/watch?v=PT5lc0Hff3s>

Mubashir A. (27 de setiembre 2015). "3D Fluid analysis of turbo machine in ansys fluent CFX+Fluent part1". Ultimo acceso 13/1/16. <https://www.youtube.com/watch?v=RIVpdlNvzw>

Progress Cycles (2015). "Buje Turbine". Ultimo acceso 1/1/16. <http://www.progresscycles.com/bujes/turbine-ctra-delantero>

Progress cycles.2015. "Rueda Progress A-88". Ultimo acceso 27/4/16. <http://en.progresscycles.com/wheels/road/aerodynamic-road-wheels-carbon-progress-a880>

Pro-lite 2014. "Pro-Lite: Birth of a Carbon Fiber Wheel (PRO-LITE Wheel Building in Taiwan)". Ultimo acceso 1/6/16. https://www.youtube.com/watch?v=x_Us6eEYPfc

Real federación española de ciclismo 2012. "Reglamento del deporte Ciclista". Ultimo acceso 24/2/16. http://fr.biolaster.com/ciclismo/posicion_ciclista_bicicleta/normativa_UCI_bicicleta/Normativa_RFEC.pdf

Resina Castro 2016. "Manual de uso y características generales Paste WIZ" Ultimo acceso 3/5/16. http://www.resinascastro.es/fotos/090228183038_OXGv.pdf

Resinas Castro 2016. "Desmoldeante sólido. PASTE WIZ" http://www.resinascastro.es/spa/gran_almacen_catalogo.asp?var1=Desmoldeantes&var2=Cera%20desmoldeante%20Paste%20Wiz&nar1=29&nar2=128&Page=

Road bike action magazine 2013. "Time Trial Bike vs Aero Road Bike vs Road Bike in the wind tunnel with Road Bike Action". Ultimo acceso 29/4/16. <https://www.youtube.com/watch?v=SAy6pumNIFQ>

Roues Artisanales 2008. "Stiffness test" <http://www.rouesartisanales.com/article-23159755.html>

Roues Artisanales 2008. "Aerodynamics test". Ultimo acceso 13/2/16. <http://www.rouesartisanales.com/article-15505311.html>

Roues Artisanales 2008. "MAVIC CCU". Ultimo acceso 13/2/16. <http://www.rouesartisanales.com/article-6936793.html>

Roure F. 2015. Departamento de Resistencia de materiales y estructuras. Apuntes Ampliación de resistencia de materiales. ETSEIB UPC. "TEMA 3 Materiales anisótropos. Composites".

Rs online 2016. "Avellanadores c nicos". <http://es.rs-online.com/web/p/avellanadores-conicos/0218630/>

Sirris 2007. "Report Crash test UCI". Ultimo acceso 13/2/16.
www.uci.ch/mm/Document/News/Rulesandregulation/16/51/79/Equipment-Modeloftestreport-NEUTRAL_Neutral.PDF

Team Bike 2009. "Aerodynamics wheels test: ZIPP and MAVIC" España, Agosto 12.

Team Bike 2009. "Zipp Firecrest" España, Agosto 12.

Team Bike 2009. "Mavic Cosmic". España, Agosto 12.

Tokyo wheel 2014 . "How are Carbon Wheels Made - Tokyowheel Factory Tour"<https://www.youtube.com/watch?v=OZspU8THG5s>

Travieso Rodríguez J. A. 2015. Departamento de procesos de fabricación. Apuntes ingeniería de procesos de fabricación. EUETIB UPC "Fresadora, Moldes"

Trek and Bontrager 2013. "Bontrager Aeolus d3 wheels". Ultimo acceso 24/7/15.
http://media.bontrager.com/images/features/201108_aeolus/bontrager_aeolus_d3_wheels.pdf

Trek and Bontrager 2016."Brand of trek Bontrager". Ultimo acceso 14/3/16.
http://www.trekbikes.com/us/en_US/company/our_brands/bontrager/

Uci and Sirris 2013."NON-STANDARD WHEELS IN CONFORMITY WITH ARTICLE 1.3.018".
Ultimo acceso 14/3/16.
<http://www.bicycleretailer.com/sites/default/files/downloads/article/Rules%20-%20Non%20standard%20wheels%20-%20EN.PDF>

Vidal J. R. "DISEÑO DE PERFILES Y SUPERFICIES SUSTENTADORAS CON EL XFLR5". Ultimo acceso 24/5/16. <http://www.enavales.com/index.php/art%C3%ADculos/111-dise%C3%B1o-de-perfiles-y-superficies-sustentadoras-con-el-xflr5.html>

Wikipedia 2016."ISO 5775". Ultimo acceso 24/5/16. https://es.wikipedia.org/wiki/ISO_5775

Wurth 2016. "Brocas de hacer"o HSS. Ultimo acceso 24/5/16. <http://www.wurth.es/broca-en-espiral-acero-hss-e8-din-338-10-0mm>

Zcam 2016. "Sistemas de corte-G3". Ultimo acceso 24/5/16.
<http://www.zcam.es/productos/sistemas-de-corte/g3/>



Escola Universitària d'Enginyeria
T cnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLIT CNICA DE CATALUNYA

Anexos

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE RUEDAS DE PERFIL PARA BICICLETA DE CARRETERA Y TRIATLÓN

PFC presentado para optar al título de Ingeniero
Técnico Industrial especialidad Mecánica

por **Sergi Liz Madrid**

Barcelona, 8 de Junio de 2016

Tutor proyecto: José Antonio Travieso Rodríguez

Departamento de Ingeniería Mecánica (DIM)



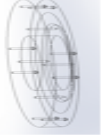

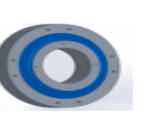
Universidad Polit cnica de Catalunya (UPC)

ÍNDICE ANEXOS








Anexos	92
ÍNDICE ANEXOS.....	93
ANEXO 1: HOJAS DE RUTA	94
1. Molde hembra	94
2. Molde macho	95
3. Molde intermedio sin válvula	96
4. Molde intermedio con válvula	97

ANEXO 1: HOJAS DE RUTA


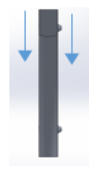




1. Molde hembra

Parámetros de corte													
N. Fase	Croquis	Máquina/fase	Descripción herramienta	Descripción fase	Vc (m/min)	f (mm/rev)	t (mm)	Nº pasadas	η (min⁻¹)	Va (mm/min)	L (mm)	t corte (min)	Nm (kW)
10		Prensa	Matriz de prensado	Subproducto	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20		Fresadora	RA245-20047-18M	Justo a limpio	60	0,4	0	2	1000	400	750	3,75	0,00
30		Fresadora	Herr. 2	Taladrado	56,52	0,05	47,5	1	1800	90	47,5	0,53	0,21
40		Brunido	Brunido con bola	Acabado bruñido	-	-	-	Calidad N4	-	600	toda la sup. contacto perfil	-	-
50		Pulido manual	P320	Pulido fino	-	-	-	Calidad N3	-	-	toda la sup. contacto perfil	-	-

2. Molde macho

Parámetros de corte													
N. Fase	Croquis	Máquina/fase	Descripción herramienta	Descripción fase	Vc (m/min)	f (mm/rev)	t(mm)	Nº pasadas	n(min ⁻¹)	Va(mm/min)	L(mm)	t corte(min)	Nm (kW)
10		Prensa	Matriz de prensado	subproducto	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20		Fresadora	RA245-200/47-18M	justo a limpio	70	0,4	0	2	1600	640	750	2,34	0,00
30		Fresadora	Herr. 1	Avellanado	62,8	0,12	5	1	1000	120	5	0,04	0,05
40		Fresadora	Herr. 2	Taladrado	56,52	0,05	47,5	1	1800	90	47,5	0,53	0,21
50		Fresadora	Bruñido con bola	Acabado bruñido	-	-	-	Calidad N4	-	600	toda la sup. contacto perfil	-	-
60		Soldador	Soldador GAP	Soldar pernos	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70		Pulido manual	P320	Pulido fino	-	-	-	Calidad N3	-	-	toda la sup. contacto perfil	-	-

3. Molde intermedio sin válvula

Parámetros de corte													
N. Fase	Croquis	Máquina/fase	Descripción herramienta	Descripción fase	Vc (m/min)	f (mm/rev)	t(mm)	Nº pasadas	n(mín^-1)	Va(mn/min)	L(mm)	t corte(min)	Nm (kW)
10		Prensa	Matriz de prensado	subproducto	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20		Fresadora	RA245-200/47-18M	Justo a limpio	70	0,4	0	1	1000	400	300	0,75	0,00
30		Fresadora	Herr. 1	Avellanado	62,8	0,12	5	1	1000	120	5	0,04	0,05
40		Fresadora	Herr. 2	Taladrado	56,52	0,05	25	1	1800	90	25	0,28	0,11
50		Bruñido	Bruñido con bola	Acabado bruñido	-	-	-	Calidad N4	-	600	toda la sup. contacto perfil	-	-
60		Pulido manual	P320	Pulido fino	-	-	-	Calidad N3	-	-	toda la sup. contacto perfil	-	-

4. Molde intermedio con válvula

Parámetros de corte													
N. Fase	Croquis	Máquina/fase	Descripción herramienta	Descripción	Vc (m/min)	f (mm/rev)	t(mm)	Nº pasadas	n(r/min~1)	Va(mm/min)	L(mm)	t corte(min)	Nm (kW)
				fase									
10		Prensa	Matriz de prensado		-	-	-	-	-	-	-	-	-
20		Fresadora	RA245-200147-18M	Justo a limpio	70	0,4	0	1	1000	400	300	0,75	0,00
30		Fresadora	Herr. 1	Avellanado	62,8	0,12	5	1	1000	120	5	0,04	0,05
40		Fresadora	Herr. 2	Taladrado	56,52	0,05	25	1	1800	90	25	0,28	0,11
50		Fresadora	Herr. 2	Taladrado	56,52	0,05	80	1	1800	90	80	0,89	0,35
60		Bruñido	Bruñido con bola	Acabado bruñido	-	-	-	Calidad N4	-	600	toda la sup. contacto perfil	-	-
70		Pulido manual	P320	Pulido fino	-	-	-	Calidad N3	-	-	toda la sup. contacto perfil	-	-

-Acti



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Planos

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE RUEDAS DE PERFIL PARA BICICLETA DE CARRETERA Y TRIATLÓN

PFC presentado para optar al título de Ingeniero
Técnico Industrial especialidad Mecánica

por **Sergi Liz Madrid**

Barcelona, 8 de Junio de 2016

Tutor proyecto: José Antonio Travieso Rodríguez

Departamento de Ingeniería Mecánica (DIM)

Universidad Politécnica de Catalunya (UPC)

ÍNDICE DE PLANOS

Planos98

ÍNDICE DE PLANOS..... 99

1. Plano aro 100

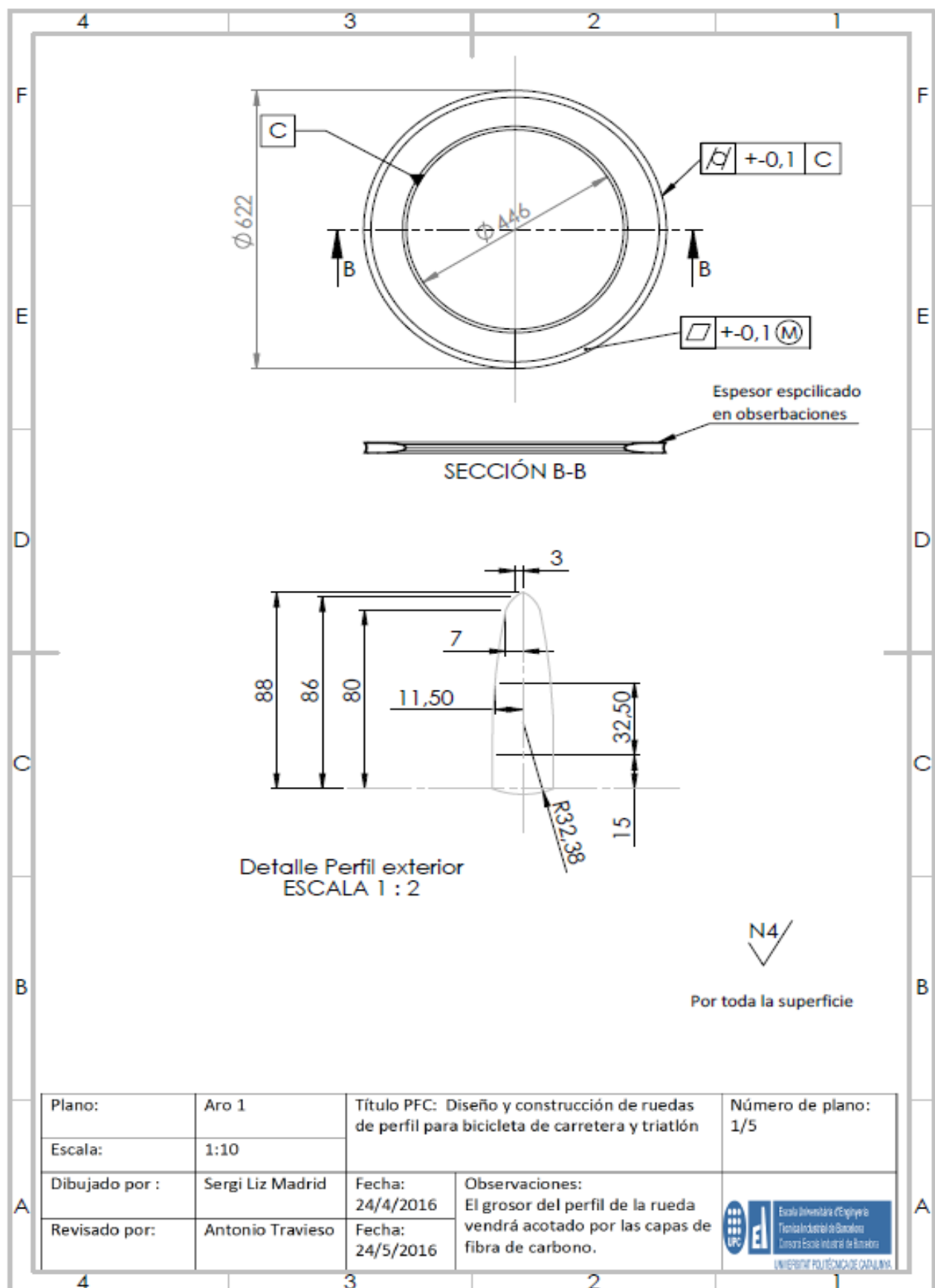
2. Plano molde hembra 101

3. Plano molde macho 102

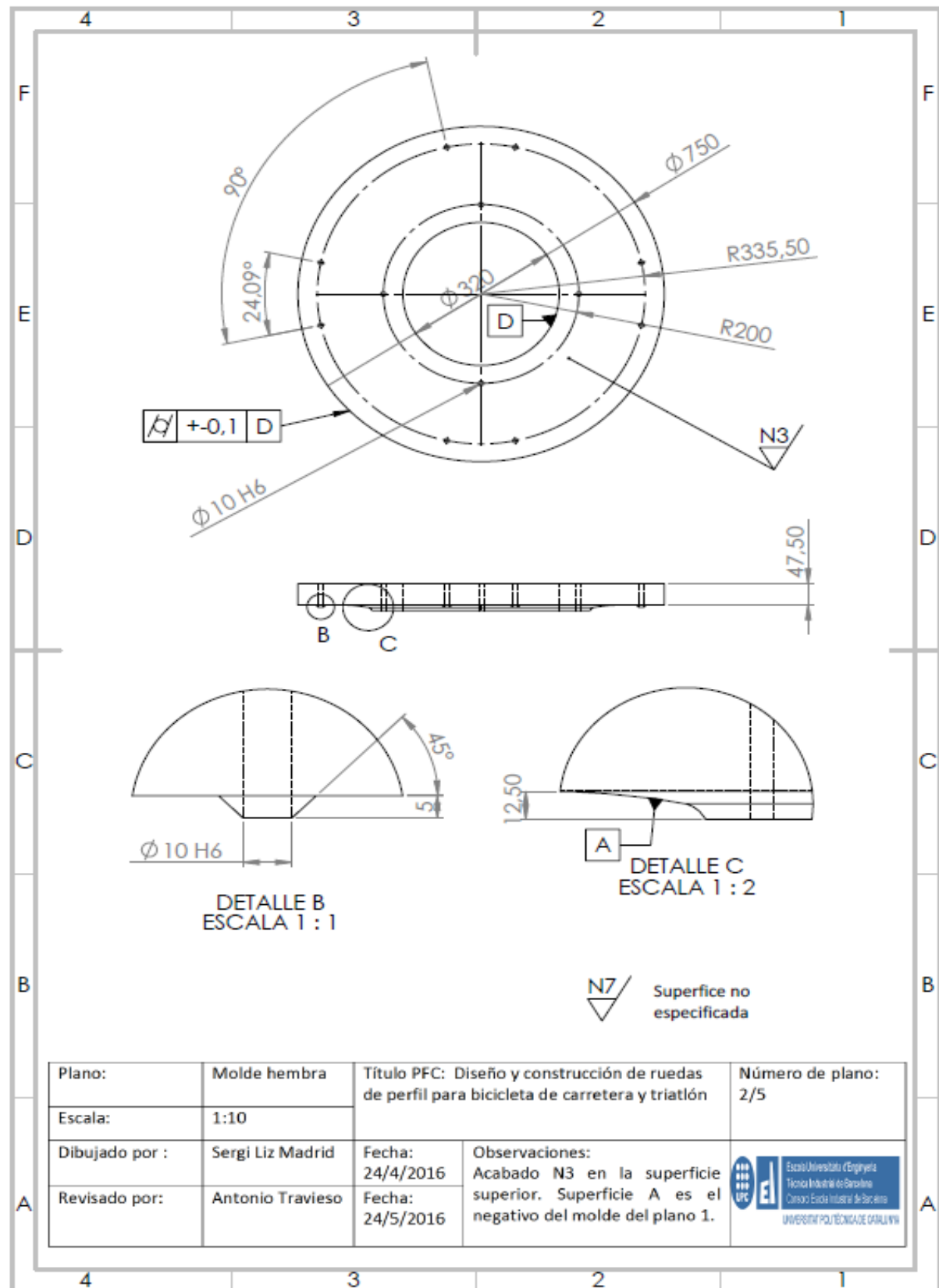
4. Plano molde intermedio con válvula 103

5. Plano molde intermedio sin válvula 104

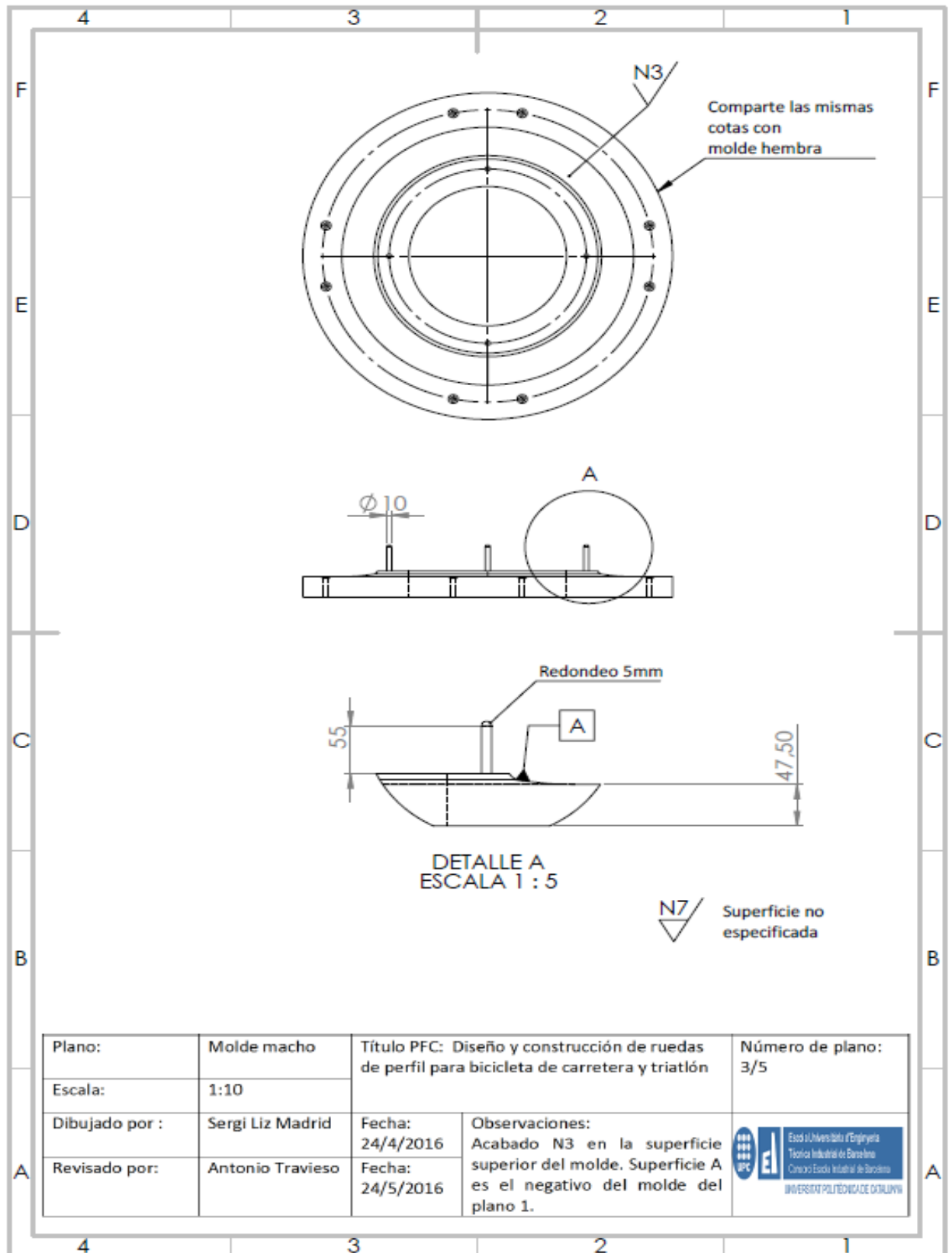
1. Plano aro



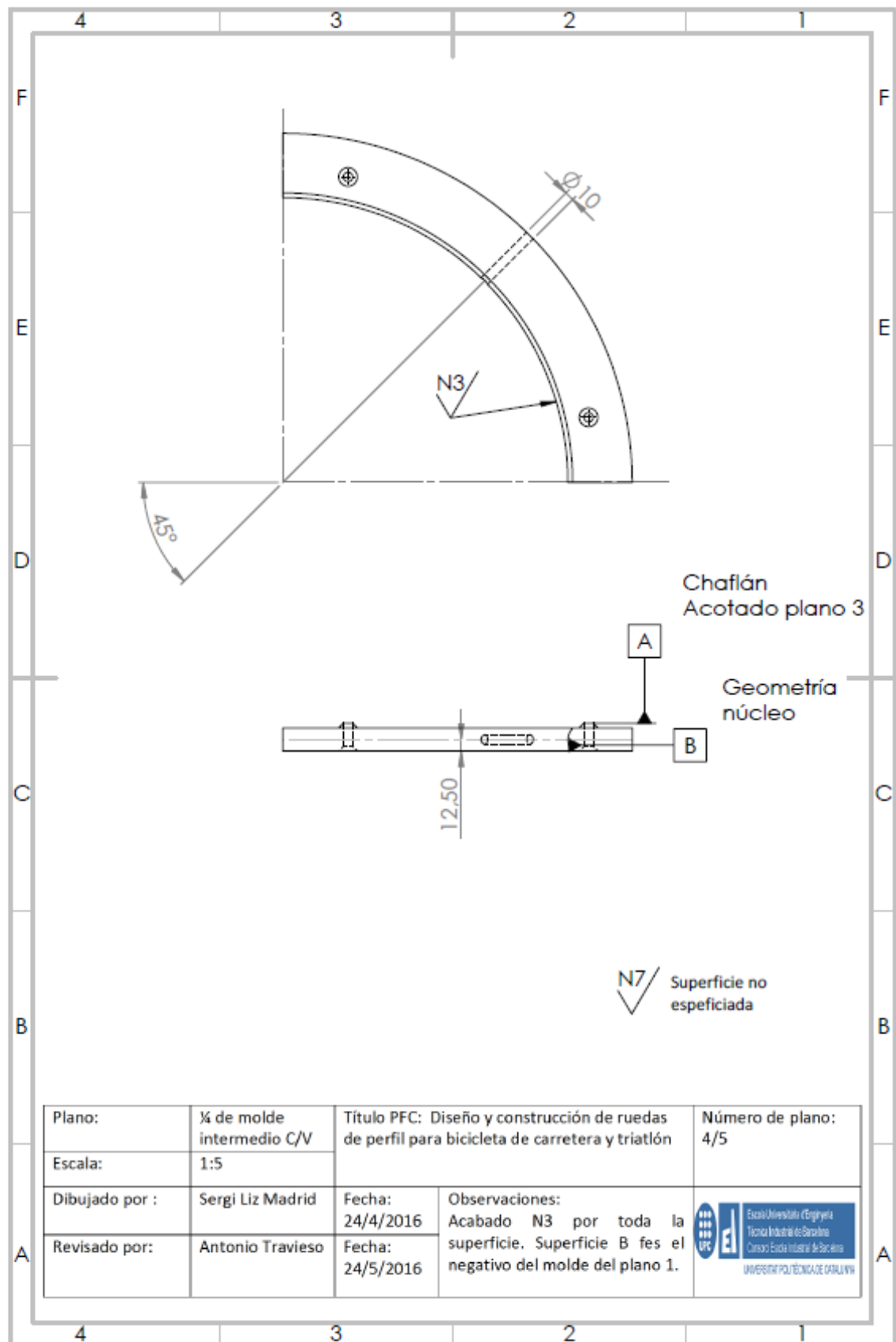
2. Plano molde hembra



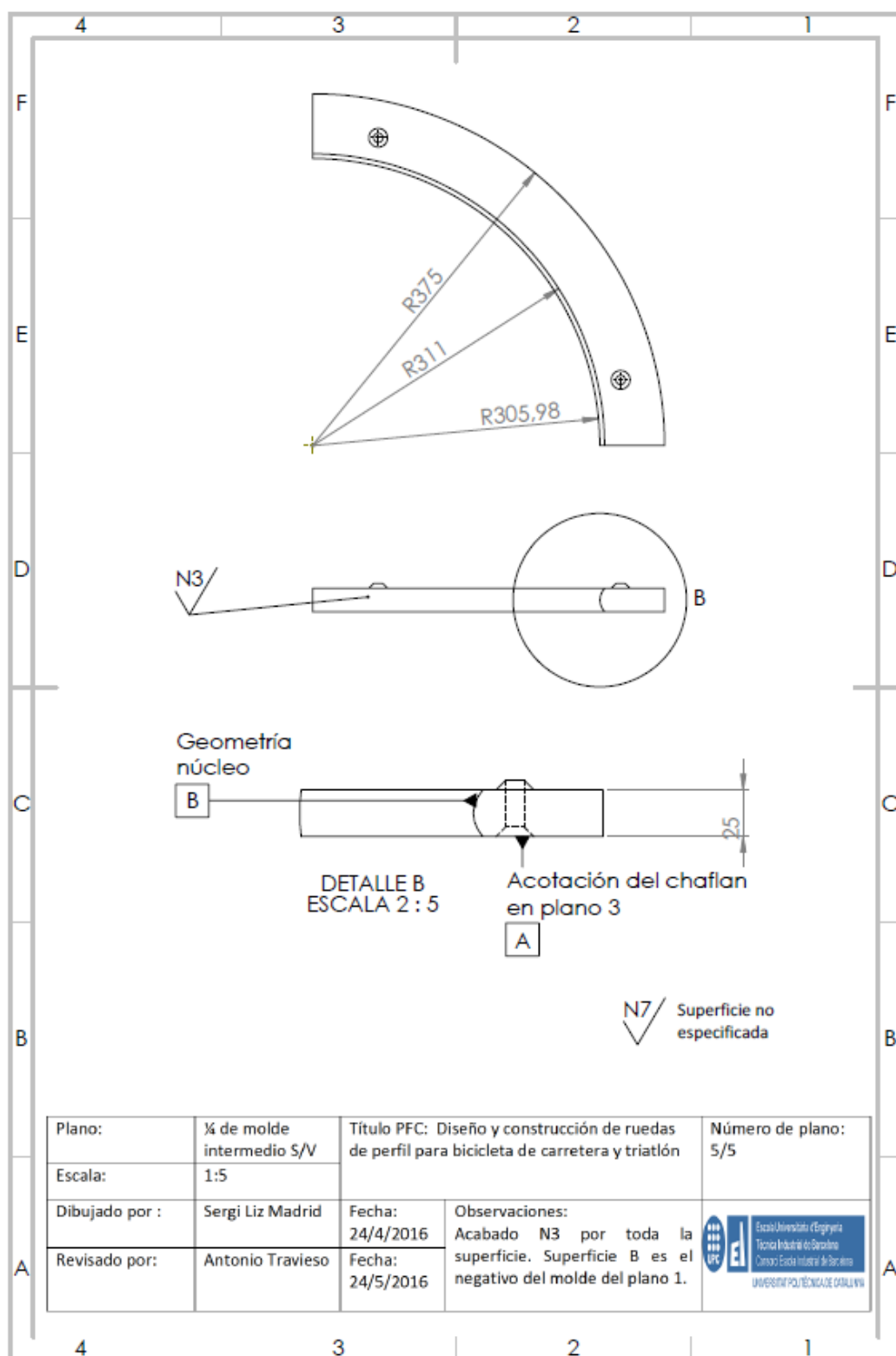
3. Plano molde macho



4. Plano molde intermedio con válvula



5. Plano molde intermedio sin válvula





Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Estudio económico

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE RUEDAS DE PERFIL PARA BICICLETA DE CARRETERA Y TRIATLÓN

PFC presentado para optar al título de Ingeniero
Técnico Industrial especialidad Mecánica

por **Sergi Liz Madrid**

Barcelona, 8 de Junio de 2016

Tutor proyecto: José Antonio Travieso Rodríguez

Departamento de Ingeniería Mecánica (DIM)

Universidad Politécnica de Catalunya (UPC)

ÍNDICE DE ESTUDIO ECONÓMICO

Estudio económico	105
ÍNDICE DE ESTUDIO ECONÓMICO	106
Estudio económico	107
1. Costes maquinaria	107
2. Costes materiales	108
3. Coste distribución e ingenieros	108
4. Coste por unidad de aro fabricado	108
5. Coste unitario rueda delantera	109
6. Coste unitario rueda trasera	109
7. Costes anuales	109
8. Ventas anuales	110
9. Balance anual	110

Estudio económico

A continuación, se hace un estudio económico de lo que costaría elaborar una rueda, y de los beneficios que nos aportaría (en todos los costes está incluido el IVA).

1. Costes maquinaria

Tabla 21. Coste maquinaria

Maquinaria	Coste €
Congelador	2.000,00
Horno	18.000,00
Compresor	1.936,55
Máquina de corte	64.000,00
Taladro	6.000,00
Total	91.936,55

2. Costes materiales

Tabla 22. Costes materiales

Materiales	Coste unitario €	Unidades	Coste €
FC Unidireccional m ²	89,00	1,97	175,37
Pliegue de lija	0,66	1,00	0,66
Cera de desmoldeo	17,00	0,10	1,70
Bolsa de presión	0,50	1,00	0,50
Válvula de presión	9,00	3,33E-06	3E-06
Laca y pintura	4,00	1,00	4,00
Limpiador de moldes	5,00	0,10	0,50
Molde	50.000,00	3,33E-06	0,17
Total			182,89

3. Coste distribución e ingenieros

Tabla 23. Coste distribución e ingenieros

Distribuidor e ingenieros	Puesto	Coste €	Beneficios %
José Antonio Travieso	Supervisor de proyectos	250.000,00	20%
Sergi Liz	Autor de proyecto	250.000,00	40%
Empresa Progress	Comercialización	1.000.000,00	40%
Total		1.500.000,00	100%

4. Coste por unidad de aro fabricado

Tabla 24. Costes por unidad de aro fabricada

Concepto	Precio €	Unidades	Coste €
Materiales	182,89	1,00	182,89
Operarios	70,00	5,00	350,00
Transporte	10,00	1,00	10,00
Total			542,89

5. Coste unitario rueda delantera

Tabla 26. Coste unitario rueda delantera

Piezas	Coste €	PVP €	Beneficio €
Aro	542,89	650,00	107,10
Buje	35,60	86,00	50,40
Radios	9,60	56,00	46,40
Total	588,09	792,00	203,91

6. Coste unitario rueda trasera

Tabla 27. Coste unitario rueda trasera

Piezas	Coste €	PVP €	Beneficio €
Aro	542,89	650,00	107,10
Buje	95,00	190,00	95,00
Radios	14,4	84,00	69,60
Total	652,29	924,00	271,70

7. Costes anuales

Tabla 28. Costes anuales

Gastos anuales	Coste mes €	Meses	Coste año 1 €	Coste año 2 €	Coste año 3 €
Alquiler	10.000,00	12,00	120.000,00	120.000,00	120.000,00
Consumos energía	15.000,00	12,00	180.000,00	216.000,00	252.000,00
Mantenimiento	8.000,00	12,00	96.000,00	115.200,00	134.400,00
Coste distribuidor e ingenieros			1.500.000,00	1.500.000,00	1.500.000,00
Impuestos y tasas	1.000,00	12,00	12.000,00	12.000,00	12.000,00
Otros gastos	2.000,00	12,00	24.000,00	24.000,00	24.000,00
Total			1.932.000,00	1.987.200,00	2.042.400,00

8. Ventas anuales

Tabla 29. Ventas anuales

Año	1	2	3
Número de ventas unidades	15.000,00	30.000,00	500.000,00
Beneficio bruto €	3.567.115,55	7.134.231,10	118.903.851,67

9. Balance anual

Se pediría un préstamo de 7,5 millones de euros, para poder comprar material, contratar el personal, comprar maquinas, pagar impuestos y permisos.

Tabla 26. Balance anual

Conceptos	Años	0	1	2	3
Gastos					
	Maquinaria	91936,55	9193,655	11032,386	12871,117
	Costes		1932000	1987200	2042400
Prestamos		7.500.000,00	2.500.000,00	2.500.000,00	2.500.000,00
	Intereses		375.000,00	250.000,00	125.000,00
Activo					
	Beneficios brutos		3567115,55	7134231,1	118903852
Beneficios Total		7.408.063,45	9.033.985,35	14.169.984,06	131.018.564,61

